



TITLE:

土-機械系の相似性に関する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

山崎, 稔

CITATION:

山崎, 稔. 土-機械系の相似性に関する研究. 京都大学, 1976, 農学博士

ISSUE DATE:

1976-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r3033>

RIGHT:



土一機械系の相似性に関する研究

昭和 50 年 7 月

山 崎 稔

土一機械系の相似性に関する研究

昭和 50 年 7 月

山 崎 稔

目 次

I 緒 言	(1)
II 土—機械系の相似性	(2)
§ 1 相似性の概念	(4)
§ 2 土—機械系の関係因子	(7)
§ 3 次元解析法	(13)
§ 4 次元解析に基づく土—機械系の相似条件	(15)
§ 5 従来の研究	(24)
III 土—機械系の相似性に関する実験	
§ 1 実験の概要	(29)
§ 2 実験〔1a〕——乾燥砂—排土板系——	
1 目的	(31)
2 相似条件の誘導	(31)
3 実験方法	(34)
4 結果および考察	
1) 乾燥砂—排土板系の相似性	(39)
2) けん引抵抗とけん引角との関係 (Π_1 vs Π_4)	(40)
3) けん引抵抗と排土板形状との関係 (Π_1 vs Π_3)	(41)
5 要約	(42)
§ 3 実験〔1b〕——砂質ローム—排土板系——	
1 目的	(43)
2 相似条件とひずみの取扱い	(48)
3 実験方法	(53)
4 結果および考察	
1) 動力学的相似性	(56)
2) 円板貫入抵抗および基準板抵抗	(56)
3) ひずみの取扱い	(61)

4) 予報精度	(71)
5 要約	(76)
§4 実験〔2〕——乾燥砂—トラック・シュー系——	
1 目的	(79)
2 相似条件の誘導	(80)
3 実験方法	(82)
4 結果および考察	
(1) 相似性実験	(88)
1) 抵抗, 沈下の概要と Π_d の決定	(88)
2) 抵抗に及ぼす各因子の影響	(90)
3) 動力学的相似性	(91)
4) Π_d と Π_e, Π_p の関係	(94)
5) 沈下に関する幾何学的相似性	(96)
6) Π_z と Π_e, Π_p の関係	(102)
7) 要約	(103)
(2) シューの形状がけん引抵抗に及ぼす影響	(104)
1) シュー各系における v, p, e の影響	(105)
2) H系, B系における h, b の効果	(107)
3) 要約	(111)
§5 実験〔3〕——乾燥砂および人工土—ロータリ系——	
A 人工土に関する実験	(111)
(1) 人工土の組成とせん断特性	(112)
1 目的	(113)
2 方法	(113)
3 結果	
1) オイルの種類によるせん断特性への効果	(114)
2) 砂の種類によるせん断特性への効果	(115)
3) ベントナイトの有無によるせん断特性への効果	(115)
4) オイル含有率によるせん断特性への効果	(115)
(2) 人工土の練り返しの効果	(117)
1 目的	(117)

2	方法	(117)
3	結果	
1)	せん断特性に及ぼす繰り返しの効果	(123)
2)	貫入抵抗に及ぼす繰り返しの効果	(125)
(3)	人工土に関する実験結果の要約	(136)
B	乾燥砂と人工土を利用したロータリの相似性実験	
1	目的	(138)
2	相似条件の誘導	(139)
3	実験方法	(148)
4	結果および考察	
1)	土の準備に関する予備実験の概要	(159)
2)	結果の概要	(162)
3)	T と Σ , v , N との関係	(165)
4)	T と R の関係	(168)
5)	相似性の検討	(171)
5	要約	(177)
IV	結 言	(178)
V	参 考 文 献	(181)

I. 緒 言

「人類が今日の人間へと進化することができたのは、道具を製作し、使用したためである。」とは、J. Lilley が彼の著書「Men, Machines and History」の冒頭において記している言葉である。

新石器時代に始まる最初の産業革命とも言うべき時代を通じて、農業の開始と結びついた各種の道具の中に、くわ、すきなどを見出すことができる。以来、今日まで急速な技術革新をなしつづけてきている機械の歴史を概観する時、土に関係する機械、器具はその古い経歴にも拘わらず最も原始の姿を止めているものの一つであると言えは過言であろうか？ とは言うものの、この分野の機械の開発や改良が放置されてきたわけではなく、数多くの労苦が払われ研究がなされて現在に至っている。

土に関係する機械、器具を新に創造したり、既存のものに改良を施す際の目的は多岐に亘っており、耐久性向上のための強度特性や摩耗に着目したり、機械の仕上げる仕事の質および量の性能を高め、安定した機械作業を目指すなどさまざまであるが、それらとともに最も重要視される莫は機械への土の抵抗に注目し、それに関する情報をうまく利用することである。たとえば、耕うん機械への土の抵抗を軽減できれば、より少ない動力で機械を駆動し同一作業が保障され、作業能率、機械効率

の向上をはかることができる。一方、履帯型トラクタの走行部についてはトラック・シューの土の把握を増大させるように、つまりより大きな土の抵抗を与えるような構造、形状の研究がなされていると言えよう。

さて、上述した種々の目的を果すために今日までに採られてきた方法を大別すれば三通りがある。試行錯誤の方法、当該の土-機械系を支配する特性方程式によるものおよびモデル (Model) による方法である。

古くから用いられてきた試行錯誤の方法は現代においても最も主要な方法の一つである。土性や水分、密度、履歴などの土の状態により土と機械、器具との相互作用現象における土の動的挙動や変位、変形は実に複雑に変わるため、対象土壤に即応して試行を繰り返し経験的な情報に基づいて機械の開発、改良をはかることが多い。試行錯誤が多くの労力と経費を要するにも拘わらず採用されているということは、裏返して言えば、他の二つの方法が未だ確立されておらず、信頼度が低いことを語っている。その確立を阻んでいる最大の原因は、土-機械系に関係している土の性質 (Soil properties) が未だ把握されていないからにほかならない。

モデルを通じて実物 (Prototype) の性能を予知するという方法は、古くはレオナルド・ダ・ヴィンチにその濫しをを求めることができるが、今日のモデル試験の段階にまで発展して

きたのは今世紀に入ってからであり、主として流体力学の分野においてである。流体を対象とする船舶、飛行機をはじめポンプ、ファンなどの機械についてはモデル試験の結果から十分な精度をもって実機の性能を予報しうる技術が確立されてきている。

これに対し、土を対象とする機械についての本格的なモデル研究 (Model study) が始められたのは、さほど古いことではない。そして、この約20年間数多くの研究がなされてきたが、前述の土の性質を適確に捉えられないことから、未だモデル試験技術を確立するためのモデル研究の域に止っている状態である。

本研究は、上述してきた状態にある土-機械系に関するモデル研究を実際の技術として活用できるモデル試験法の確立という段階にまで到達させるための成果を上げることが窮極的な目的として行なわれたものである。各実験の具体的なねらいについては、以下に続く章節に述べる。

II. 土一機械系の相似性

§ 1. 相似性の概念

モデルの実験結果から実物の性能を十分な精度をもって予報するためには、モデル、実物の両系について相似性が成立しなければならない。そこで、相似性の概念を明確にする必要がある。

一般にモデルと言えは、実物に対して相似形状を持つこと、すなわち、幾何学的相似性を具備しているものを念頭に浮べることが多い。しかし、幾何学的相似性のみが成立している両系の間に動的挙動や内部応力の発生状態に関して相似性が成り立つ保障は全くない。たとえば、標準型トラクタについてそのモデルを幾何学的相似性を満足させるように製作し、そのモデルの実験からトラクタの動的挙動に関する情報を得ようとしても似て非なる結果をもたらすことになる。したがって、トラクタの動的挙動に関する動力特性、重心を通る3軸に関する慣性モーメントをはじめばね定数、減衰係数や速度、加速度、重量分布などの諸量を考慮してモデルに対する条件を付け加える必要がある。運動力学的相似性および動力学的相似性と呼ばれるものがそれである。

以上を要約すれば、幾何学的相似性 (Geometrical Similarity)、運動力学的相似性 (Kinematic Similarity) および

動力学的相似性 (Dynamic Similarity) が実物とモデルの両系間に成立してはじめて有効な情報が得られるわけである。三つの相似性のうち、運動学的相似性は動力学的相似性が成立していれば等しく成立すると考えてよいから、相似性と言えは幾何学的相似性と動力学的相似性について検討する方法がとられている。

幾何学的相似性は実物およびモデルの両系のそれぞれ対応する辺の長さ (Homologous Length) が一定の比 (Length Scale) を持ち、対応する角度 (Homologous Angle) が等しければ成立し、比較的容易に達成できる。

これに対し、動力学的相似性は系に作用する2個以上の力の比が両系について等しい場合に成立していると言える。

図2-1において、 F_1/F_2 と F_3/F_4 の関係が F_{1m}/F_{2m} と F_{3m}/F_{4m} との関係に等しい場合に、はじめて両系には動力学的相似性が成立していることが確認されるわけである。

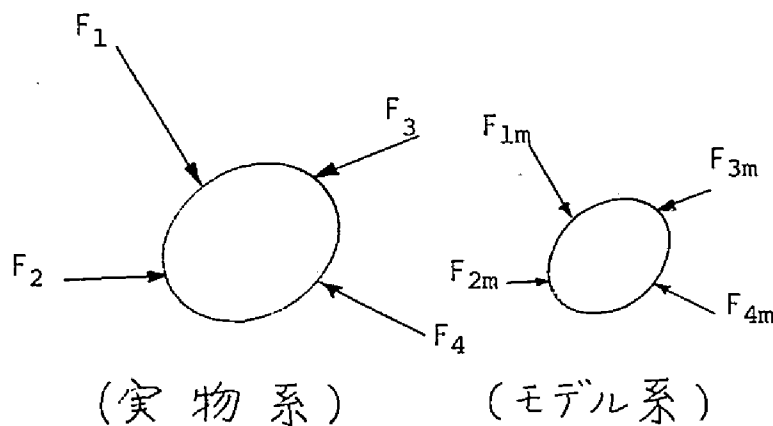


図2-1, 動力学相似性

§2. 土-機械系の関係因子

モデルを通じて実物の動的特性に関する有効な情報を抽出するためには、動力学的相似性が幾何学的相似性ととも成立する必要があることが前節において強調された。

土-機械系に関して相似性を成立させるためにモデルに与えるべき条件を相似条件 (Design or Operating Conditions) と呼ぶことにする。相似条件を求める方法には、当該の系の特性方程式から導き出す方法と次元解析法 (Dimensional Analysis) によるものがある。

土-機械系の相似条件を取扱ったものとしては、わが国で最も早い研究として川村氏による「模型プラウの相似法則について」²⁾を挙げることができるが、その手法は前者によったものである。すなわち、土の応力とひずみの関係から微分方程式を立て、無次元化してモデルプラウに与えるべき相似条件を明らかにしたものである。

一方、1950年代に始まり1960年以降一段と盛んに行なわれてきている土関係の機械の相似性の研究においては、その大部分が次元解析法を採用している。当該の系を支配する特性方程式から相似条件を誘導する方法は、土-機械系については特に複雑かつ困難な問題を含むことが多いのに対し、次元解析法においては、当該系に關与する因子を適正に選定すれば機械的な計算方法によって相似条件が得られるという利点がある。

本研究においても、上記の理由により次元解析法を用いたが、次元解析法そのものについては次節において述べることにし、まず、土-機械系の関係因子について概論する。

土-機械系に関係する因子を次の3種類に大別できると考える。

1. 機械に関係する因子

これは、機械の大きさ、形状、運転または作動条件および機械系への外力、反力などの因子を意味している。

2. 土に関係する因子

土の組成、密度をはじめ、土質常数 c 、 ϕ 、円錐体（コーン）や平板（プレート）の貫入抵抗に関係する量など数多くの因子が従来の研究において選定されている。

3. その他の関係因子

重力加速度に代表されるように、当該系には関係するが、一定と考えて差支えない因子を含んでいる。

以上の諸関係因子は人為的にコントロールでき、実験条件として設定できる耕深とか耕うん速度とかいった独立因子と、結果として生ずる、たとえば土の反力などの従属因子のいずれかに分けることができる。これまでに行なわれてきた研究において選定された土-機械系の関係因子を筆者の分類法により、表2-1に示す。

表 2-1. 従来の研究における土-機械系関係因子

種 類	因 子 名	記 号	次 元
1. 機械系	長さ 角度 速度 時間 力	l θ v t F	L - L T^{-1} T F
2. 土 系	粘着力 内部摩擦角 粘度 密度 比重 引張強さ 圧縮係数 弾性係数 破壊係数 粒子径 水分 粘土含有率	c ϕ η ρ γ T m, n, c, b E R r M N	F L^{-2} - F L^{-2} T F L^{-4} T^2 F L^{-3} F L^{-2} F^{-1} L^3 F L^{-2} F L^{-2} L - -
3. 土-機械系 その他	付着力 土-金属摩擦角 重力加速度	A δ g	F L^{-2} - L T^{-2}

表中、機械系の因子のうち、力 (Force) は作用力と反力を含んでいることを付言するにとどめ、以下土の関係因子について更に詳しく述べる。

土は通常、気体、液体、固体の3相から成っているが、各相の割合により、また固相を形成する土の鉱物粒子の粒径および粒形が広範、多様に分布存在することにより非常に複雑な性質を示す。それらの性質としては、粘着性、負荷荷重に依存する性質、ひずみおよびひずみ速度によって変化を示す性質および圧縮作用に依存する性質などがよく知られている。そして、ある土-機械系に生ずる現象においては、上に述べた諸性質が純粹に単独で出現する場合はほとんどなく、種々の性質が同時に生起していると言ってよい。しかしながら、土と機械の相互作用において、たとえば、その現象が土の粘着力に強く支配されるという場合には、数多い土の性質の中でもその粘着力を関係因子として測定する必要がある。また、たとえ何が主要な性質なのか不明な現象を取扱っていても、まず前記の土の性質を何らかの方法で測定し、その結果から逆にその現象に関係している土の性質因子を解明する糸口を見出す必要がある。

以上の理由により、各種の土壌測定器が製作され実験に供されている。従来用いられてきた土壌測定器を測定対象である土の種類と測定量の質によって分類する。

土壌を土質常数 c , ϕ により、① $c=0$, $\phi \neq 0$, 粘着

力がなく、乾いた砂が相当する、② $\phi = 0$, $c \neq 0$ 粘土の液化化した状態 および ③ $c \neq 0$, $\phi \neq 0$ 普通の土壌が相当する、の3通りに大別する。

次に、測定量の質の点から、① 土質常数、その土に固有な性質で測定器の影響を受けないもの、② パラメータ (Soil-Service Parameter)、測定器の特性に強く依存しているもの、および ③ アナログ (Analog), 取扱いの複雑な系を簡単に、かつ小型に記述、表現した量の3種類になる。

土-機械系の相似性に関する第4回セミナー(米国, 1969年)での報告³⁾をもとに、土壌測定器の分類を表2-2に示す。

表 2-2. 土壌測定器の分類
(法)

測定器 (法)	測定項目	特性値	質	適用土壌
3軸試験器	応力・ひずみ・時間	c, ϕ, n, m, n_c, b, E	I	1, 2, 3
単軸試験器	応力・ひずみ・時間	q_u	II	2, 3
(非拘束)		c	I	2
直接せん断器	応力・ひずみ・時間	c, ϕ, n	I	1, 2, 3
リング・シエア	トルク・角・荷重・回転速度	c, ϕ, n	II	1, 2, 3
	沈下量	k	III	1, 2, 3
シエアー・グラフ	トルク・荷重	c	I	1, 2, 3
シエアー・ベン	トルク・角度	c	I	2
プレート貫入計	圧力・沈下量・時間	s	II	1, 2, 3
		K_c, K_ϕ, n	II	1, 2, 3
		K'_c, K'_ϕ, n'	II	1, 2, 3
		c, n	I	2
		C_r	III	1, 2, 3
傾斜プレート	水平・垂直力・水平・垂直変位	$H/Q, x/1$	III	1, 2, 3
貫入計				
コーン貫入計	圧力・沈下量・時間	CI, PR	II	1, 2, 3
		c, n	I	2
		G	III	1, 2, 3
振動試験器	振動数・振巾・位相	n, E	I	1, 2, 3
引張試験器	軸方向荷重	T	I	2, 3
梁荷重器	荷重	R	I	2, 3
放射線	カウント	γ, ρ	I	1, 2, 3
サンプラー	体積・重量	γ, ρ	I	1, 2, 3
粒径分析	通過パーセント	r	I	1, 2, 3
2個のモデル	特性パラメータ	予報関係	モデル	1, 2, 3
実物	特性パラメータ	特性パラメータ	モデル	1, 2, 3

* I---土質常数, II----パラメータ, III-----アナログ

** 1--- $c = 0$ の土壌, 2---- $\phi = 0$ の土壌, 3----- $c \neq 0, \phi \neq 0$ の土壌

§3 次元解析法

次元解析とはある現象から情報 (Informations) を抽出する方法であり、その現象が関係する因子間に次元的に正しい関係式で表わすことができるという簡単な仮定に基づいている。

Glenn Murphy の適確な説明⁴⁾の要旨を引用すれば、次のようになる。

「次元解析は相似理論・解析の有効な一手段であり、元来現象に含まれる物理量の次元を考へるところから発生してきた。それには、次の二つの原則がある。

公理 (Axiom) 1; 量が絶対値上、等しいということは、その量が質的にも同じものである時のみに言える。

公理 (Axiom) 2; 同一単位が用いられれば、二つの量の大きさの比はその単位に関して独立である。

次元解析は本来量的というよりも質的な関係を与えるのであるが、実験を伴って量的にも正確な予報を可能にするものである。」

物理量に次元 (Dimension) という概念を初めて与えたのは、スコットランドの物理学者 James Clark Maxwell (1831~79) で、Force, [F]; Mass, [M]; Length, [L]; Time, [T]; Temperature, [θ] を基本的次元として 1871 年に発表している⁵⁾。次元解析は、1899 年以前に既に英国の Lord Rayleigh (1842~1919) のアルゴンガスの粘度に対する温度の影響⁶⁾についての研究⁶⁾におい

て用いられていた。その後、Rayleighの方法とは異なるが、本質的には等しいと言える Buckingham's Theorem が 1914 年に公表され⁷⁾、次元解析の理論的基礎がうち立てられた。そして、P. W. Bridgman⁸⁾ (1922) および E. R. Van Driest⁹⁾ (1946) によって理論の完成がなされてきたものである。

次元解析法は、式の類別とその普遍化、単位系の変換、式の展開、実験計画におけるデータ収集の系統化、変数の数を減らすといった工学上の種々の応用が効き、多くの利点を持っている。その上、本研究に直接関係するモデルの設計、操作および実験結果の説明のための原則を与えてくれるものである。

さて、次元解析の基礎である Buckingham の Π 定理とは、「ある式が同種 (Homogeneous) であれば、その式は一組の無次元の積 (Dimensionless Products) の関係に減らして表わすことができる。」というものである。

いま、変数 α_1 が $\alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$ という変数との間に、次の関係を持っているものとする。

$$\alpha_1 = f(\alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \dots, \alpha_n) \quad \dots\dots\dots (2-1)$$

この式が homogeneous equation であれば、次式のように変形できる。

$$\Pi_1 = F(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \dots, \Pi_{n-r}) \quad \dots\dots\dots (2-2)$$

各 Π 項は $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ よりなる無次元量であり、 r は各変数の次元マトリックスの階数である。したがって、(2-1)式で

n 個の変数による関係式が(2-2)式に示されるように $(n-r)$ 個の無次元量の関係に変数の数を減らして表わすことができる。

§4 次元解析に基づく土-機械系の相似条件

一般に、土-機械系の相似性に関する研究で対象とする機械および土の種類はさまじくあるが、その系に関する因子は共通するものが多い。

いま、一般例を通じて、次元解析による相似条件を誘導してみよう。表2-3に関係因子を示す。

表2-3. ある土-機械系の関係因子

因子名	記号	次元
力	R	F
長さ	l, l_i^*	L
角度	θ	-
速度	v	$L \quad T^{-1}$
土の比重	w	$F \quad L^{-3}$
土の性質	α	$F \quad L^{-2}$
(Soil Property)	β	$F \quad L^{-3}$
重力加速度	g	$L \quad T^{-2}$

* 添字 i は1, 2, 3, ...の値を持つ。

プラウを例にとって各因子を説明すれば、 R はプラウ抵抗 l および l_i は耕巾、耕深などが相当し、 θ は耕起角などを意味する。 v は耕うん速度であり、土の比重や密度および重力加速

度はよく選定される因子である。次に、土の因子であるが、これには表2-1にも例示したように、実に多くのものが従来採用されている。ここでは、それらの中でも代表的なせん断試験に基づく土の粘着力 c を、その次元が FL^{-2} であることから、 α と考え、 β を土の圧縮に関する因子と仮定する。

次元の表現方法には、 MLT 系と FLT 系の二通りがあるが、 $F = MLT^{-2}$ なる関係があるから、いずれの系を用いても変換が容易である。

いま、プラウ抵抗 R が他の因子と次式で示される関係を持つものとする。

$$R = f(l, l_t, \theta, v, w, \alpha, \beta, g) \dots\dots\dots (2-3)$$

Buckinghamの Π 定理により、次元解析を行なう。

まず、各因子の次元マトリックス(Dimensional Matrix)を作る。

	R	l_t	θ	v	α	β	l	w	g
F	1	0	0	0	1	1	0	1	0
L	0	1	0	1	-2	-3	1	-3	1
T	0	0	0	-1	0	0	0	0	-2

この次元マトリックスは零ではない。すなわち、右3行の行列式を計算すると、

$$\begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -3 & 1 \\ 0 & 0 & -2 \end{vmatrix} = 2$$

となる。よって、次元マトリックスの階数(Rank)は3であるから、次元解析の結果得られる無次元量は(2-2)式に示されるように、因子の総数から階数を差し引いた数 $9-3=6$ 個となる。次に、無次元量の計算に移る。

いま、各因子が無次元量に含まれた場合の指数を k_i ($i=1, 2, \dots, 9$) とする。

$$\Pi = R^{k_1} \cdot \rho^{k_2} \cdot \theta^{k_3} \cdot v^{k_4} \cdot \alpha^{k_5} \cdot \beta^{k_6} \cdot \xi^{k_7} \cdot w^{k_8} \cdot g^{k_9} \dots\dots\dots (2-4)$$

ここで k_i がいかなる値をとっても、 Π の次元に対応しなければならぬから、

$$[\Pi] = [F]^{k_1} \cdot [L]^{k_2} \cdot [O]^{k_3} \cdot [LT^{-1}]^{k_4} \cdot [FL^{-2}]^{k_5} \cdot [FL^{-3}]^{k_6} \cdot [L]^{k_7} \cdot [FL^{-3}]^{k_8} \cdot [LT^{-2}]^{k_9} \dots\dots\dots (2-5)$$

書きかえると、

$$[\Pi] = [F]^{(k_1+k_5+k_6+k_8)} [L]^{(k_2+k_4-2k_5-3k_6+k_7-3k_8+k_9)} [T]^{(-k_4-2k_9)} \dots\dots\dots (2-6)$$

Π の次元は零であるから、 $F \cdot L \cdot T$ の各指数も零でなければならない。

$$\left. \begin{aligned} k_1 + k_5 + k_6 + k_8 &= 0 \\ k_2 + k_4 - 2k_5 - 3k_6 + k_7 - 3k_8 + k_9 &= 0 \\ -k_4 - 2k_9 &= 0 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2-7)$$

以上の(2-7)式までを導くには、一般に次のように次元マトリックスを利用する方法が採られる。

次元マトリックスとは、各因子の次元をマトリックスで表し、これを無次元量に適用する。

	R	ℓ_i	θ	v	α	β	ℓ	w	g	α_i
	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9	α_i
F	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0
L	0	1	0	1	-2	-3	1	-3	1	0
T	0	0	0	-1	0	0	0	0	-2	0

上の次元マトリックスについて、F・L・T別に(2-7)式の連立方程式を求めればよい。(2-7)式を、 K_7, K_8, K_9 について解く。

$$\left. \begin{aligned} K_7 &= -3K_1 - K_2 - \frac{1}{2}K_4 - K_5 \\ K_8 &= -K_1 - K_5 - K_6 \\ K_9 &= -\frac{1}{2}K_4 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2-8)$$

ここで、

$$K_1 = 1, \quad K_2 = K_3 = K_4 = K_5 = K_6 = 0$$

$$K_2 = 1, \quad K_1 = K_3 = K_4 = K_5 = K_6 = 0$$

⋮

$$K_6 = 1, \quad K_1 = K_2 = K_3 = K_4 = K_5 = 0$$

表に示された(4)の項の完全な意味を(2-8)式とおくと、その順序にしたがって K_7, K_8, K_9 が算出される。

すなわち $K_7 = -3, K_8 = -1, K_9 = 0$ の場合を以て、最初の項

から始めると $K_7 = -1, K_8 = 0, K_9 = 0$ の場合も、その順序にしたがって

とすれば $K_7 = 0, K_8 = -1, K_9 = 0$ の場合も、その順序にしたがって

このように完全な意味を(2-8)式に求めると、異なることによって、そのすべての解を示す次元マトリックスは、次のように書くことができる。

	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6	k_7	k_8	k_9
	R	ℓ_i	θ	v	α	β	ℓ	w	g

Π_1	1	0	0	0	0	0	-3	-1	0
Π_2	0	1	0	0	0	0	-1	0	0
Π_3	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Π_4	0	0	0	1	0	0	-1/2	0	-1/2
Π_5	0	0	0	0	1	0	-1	-1	0
Π_6	0	0	0	0	0	1	0	-1	0

得られた各 Π 項を、表2-4に示す。

表2-4. Π 項

$$\begin{aligned}
 \Pi_1 &= R \cdot \ell^{-3} w^{-1} = R / (w \cdot \ell^3) \\
 \Pi_2 &= \ell_i \cdot \ell^{-1} = \ell_i / \ell \\
 \Pi_3 &= \theta \\
 \Pi_4 &= v \cdot \ell^{-\frac{1}{2}} g^{-\frac{1}{2}} = v / \sqrt{\ell \cdot g} (\approx v^2 / (g \cdot \ell)) \\
 \Pi_5 &= \alpha \cdot \ell^{-1} w^{-1} = \alpha / (\ell w) \\
 \Pi_6 &= \beta \cdot w^{-1} = \beta / w
 \end{aligned}$$

表に示された6個の Π 項は完全な無次元量 (Complete Set of Dimensionless Products) と呼ばれ、互いに独立な量である。すなわち、表2-3に掲げた各因子を用いて、表2-4の Π 項以外の無次元量は無限にあるけれども、そのいずれをとっても上記6個の Π 項のうちの幾つかの組合わせでできる積である。このような完全無次元量を流体力学の分野に求めると、有名な Reynolds Number ($vL\rho/\mu$), Froude's Number (v^2/gL),

Pressure Coefficient ($F/\rho v^2 L^2$) および Mach's Number (v/c) が挙げられる。

Π 項を用いて (2-3) 式を書きかえると,

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6) \quad \dots\dots\dots (2-9)$$

となる。さて、プラウ抵抗 R は (2-9) 式に変換されたわけであるが、これより先は $\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_6$ を組合わせて実験を行ない、 Π_1 との関係を求めることになる。次元解析の結果、当初の因子数が減って実験上の便宜は多大である。

次に、モデル試験に際しては、相似条件をモデル系に与えなければならない。それには (2-9) 式の $\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6$ を実物系と等しくモデル系に与えれば、同一値の Π_1 が得られることになる。いま、モデルを添字 m で示せば次のようになる。

$$\frac{\ell}{\ell_i} = \frac{\ell_m}{\ell_{i,m}} \quad (2-10-1)$$

$$\theta = \theta_m \quad (2-10-2)$$

$$\frac{v^2}{g \ell} = \frac{v_m^2}{g_m \ell_m} \quad (2-10-3)$$

$$\frac{\alpha}{w \ell} = \frac{\alpha_m}{w_m \ell_m} \quad (2-10-4)$$

$$\frac{\beta}{w} = \frac{\beta_m}{w_m} \quad (2-10-5)$$

} $\dots\dots\dots (2-10)$

上式が、実物・モデル両系間に成立すれば、

$$\frac{R}{w \ell^3} = \frac{R_m}{w_m \ell_m^3} \quad \dots\dots\dots (2-11)$$

という予報式 (Prediction Equation) が成り立つ。よって、 $\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_6$ の独立無次元量は、相似法則、相似則と呼ばれ、英語では Design or Operating Conditions または Similarity Requirements という名称を与えられているが、筆者は敢えて、“相似条件”と呼ぶことにし、その理由は後に述べる。

(2-10-1)式を書きかえると、次式をうる。

$$\frac{l}{l_m} = \frac{l_i}{l_{i_m}} = n \quad \dots\dots\dots (2-12-1)$$

これは、実物とモデルの相対応する長さの比が等しくなければならぬことを意味し、 n は縮尺比 (Length Scale) である。次に、(2-10-2)式は両系の対応する角度が等しいということであり、以上で両系に幾何学的相似性が成立していなければならぬことがわかる。(2-10-3)式は前述した Froude's Number である。この Π 項は慣性力に比例する量を重量で除した量に相当し、土-機械系においてもしばしば扱われる無次元量である。(2-10-3)式において、重力加速度は同一地帯では同じ値と考えてよいから、 $g = g_m$ としよ。したがって、

$$v = v_m \sqrt{n} \quad \text{or} \quad \frac{v}{v_m} = \sqrt{n} \quad \dots\dots\dots (2-12-2)$$

となり、縮尺比 n から簡単に、たとえば、実物のプラウのある耕うん速度に対して、モデルのプラウはいかなる速度で耕うんすればよいか計算できる。(2-10-4), (2-10-5)両式は、

土の因子を含んだ Π 項である。両式より、次の3式をうる。

$$\left(\frac{\alpha}{\alpha_m}\right) \cdot \left(\frac{w_m}{w}\right) = n \quad \dots\dots\dots (2-12-3)$$

$$\frac{\beta}{\beta_m} = \frac{w_m}{w} \quad \dots\dots\dots (2-12-4)$$

$$\left(\frac{\alpha}{\alpha_m}\right) \left(\frac{\beta}{\beta_m}\right) = n \quad \dots\dots\dots (2-12-5)$$

土の因子 α , β を測定して、実物・モデル各系の対象とする土について、(2-12-3), (2-12-4) 両式が成立するようにして実験をするか、または、 α , β 間に(2-12-5)式で示される関係が存在するように土を準備して実験することが、少なくとも表2-3に示した関係因子を選定した場合の相似性成立条件であることを意味している。相似条件が満足していれば、 $\Pi_i = \Pi_{im}$ という予報式が成立するが、上記の例で、粘着力 α と土の圧縮係数 β を相似条件に従って土の状態をつくり出すことは不可能である。また、例題では α , β という2個の土の因子を選定したが、たとえ、 α または β のいずれか1個について、(2-12-3)または(2-12-4)の式を満足させるように土の準備をすとしても至難と考えられる。この相似条件は選定因子によって当然変わってくるものであるが、何を選定したとしても同種の問題に直面することになる。まして、土-機械系については、その現象に土のいかなる因子が密接に関与しているのかが明白でない。換言すれば、流体力学の分野とは異なり、

表2-1 に例示した種々さまざまな土の性質が各研究者によって選定され、その因子を含む相似条件がいかんひずみを生じるかに焦点が当てられているのである。よって、筆者が“相似条件”と呼ぶのは、流体力学における相似法則の段階には未だ達していないという意味を含めての事である。

以上の事情により、土-機械系では、一般にひずみモデルとならざるを得ない。いま、簡単にするために、ある現象を次式で示すものとする。

$$\Pi_1 = f(\Pi_2, \Pi_3) \quad \dots\dots\dots (2-13)$$

Π_3 のモデル系に与える値 Π_{3m} が α だけひずみを生じたものとし、 Π_2 については両系を満足しているとすれば、

$$\Pi_2 = \Pi_{2m}, \quad \Pi_3 = \alpha \cdot \Pi_{3m} \quad \dots\dots\dots (2-14)$$

となり、 α はひずみ係数 (Distortion Factor) と呼ばれる。

Π_{3m} がひずみを生じた結果、 Π_1 と Π_{1m} の関係は、

$$\Pi_1 = \delta \Pi_{1m} \quad \dots\dots\dots (2-15)$$

となる。 δ は予報係数 (Prediction Factor) である。

ここで、 Π_3 の Π_1 に及ぼす影響が既知であるような問題を扱う場合には、 δ と α との関係は簡単に求められるが、多くの場合、 δ と α の関係は複雑である。すなわち、

$$\delta = \frac{\Pi_1}{\Pi_{1m}} = \frac{f(\Pi_2, \Pi_3)}{f(\Pi_{2m}, \Pi_{3m})} = f_1(\alpha, \Pi_2, \Pi_3) \dots\dots\dots (2-16)$$

ひずみを生じている Π_3 が次式のように分離できる場合には、

$$\Pi_3 = \Pi_3^a f_2(\Pi_2) \dots\dots\dots (2-17)$$

δ と α の関係は、

$$\delta = \frac{\Pi_1}{\Pi_{1m}} = \frac{\Pi_3^a f_2(\Pi_2)}{\Pi_{3m}^a f_2(\Pi_{2m})} = \frac{\Pi_3^a f_2(\Pi_2)}{\alpha^a \Pi_3^a f_2(\Pi_{2m})} = \alpha^{-a} \dots\dots\dots (2-18)$$

となり、 δ は α^{-a} という関係式で示されることになる。

§ 5. 従来の研究

1. 研究対象

モデルを用いた土-機械系に関する研究は 1940 年代から始められ、その初期の研究としては、履帯下の土の支持力に関するもの⁽¹⁰⁾および車両のモビリティ (Mobility) を扱ったものが挙げられる。耕うん・碎土・整地関係の機具としてはプラウ (Plow)^{(2), (4), (5)}が最初であり、チゼル (Chisel)^{(6), (7)}、スウィープ (Sweep)⁽⁸⁾および排土板 (Bulldozing blade)^{(9), (20)}などが研究対象とされてきた。それらは、すべてけん引型作業機具であり、回転駆動型作業機具としては、B. N. Ghosh 氏の研究⁽²⁰⁾に見られるロータリ耕うん作業機が唯一である。

車両のモビリティやトラフィカビリティ (Trafficability) ,
 また車輪、履帯そのものに関する研究が盛んになるにつれ、コ
 ーシヤプレートに代表される貫入体についての研究がなされた。^{22)~28)}
 そのほか、土の状態を測定したり、コントロールする必要のある
 ことから、土壤測定器が相似性研究の対象とされたり^{29)~32)}、土壤
 槽に関する研究など^{34), 35)}、周辺の問題が採りあげられている。

自然土壤に代わる人工土 (Artificial soil) が B. Hanamoto 氏
 によって最初に研究されはじめたのは、1950年代と考えられる
 が、以来現在に至るまで人工土は、相似性研究の進展とともに、
 多くの研究者により実験研究の対象とされてきている。^{37)~46)}

以上は、主として農業機械に関するものであるが、そのほ
 か、建設機械の分野における岩盤掘削機や月面車両に係る
 ものなど、相似性の研究は広範囲に亘っている。

2. 研究方法および成果の概要

モデル実験の結果から実物についての高精度の情報を得よ
 うとする場合、当然、ひずみモデル (Distorted model) の取扱
 方法が、ほとんどすべての研究の中心課題とされてきた。H.
 L. Langhaar が、「モデル研究者の仕事の中心は、モデルの
 完全相似からの離脱、すなわち、ひずみをいかに正当化し、補
 償するかについての理論を採求することである。」と指摘して
 いる通りである。⁴⁷⁾

土-機械系においては、スケール効果 (Scale effects) の問題を除けば、ひずみの主たる原因は、土を相似条件に合わせてコントロールできないという点にある。従来試みられてきたひずみの取扱方法とその成果の概要は、以下の通りである。

i) 当該の系に大きな影響は持たないが、その因子があるためにひずみを助長している、という因子を除去する。

この方法については、たとえば、重力加速度を除去することが有効であるとした報告⁴⁸⁾や、低速領域の実験では速度の除去が効果的であるという結果が発表されている⁴⁹⁾。

ii) 解析的方法または実験的方法により、ひずみの影響を決定する。

大半の研究はこの方法を採用し、特に実験的方法によりひずみ量を求めているものが多い。前述のように、種々の土因子が選定され^{50), 51)}、ひずみ係数と予報係数との関係が追求されているが、土質常数 c 、中よりもコーンに代表される貫入体の貫入抵抗を因子として用いる方が、ひずみをより精度良く捉えることができるとした研究結果が多い^{17), 19)}。しかし、予報精度として、 $\pm 10\%$ を目標とする場合⁵²⁾、この研究方法による成果には未だ多くの問題が残されている。

iii) 「同一土壌 (The same soil)」におけるモデル・テストの実施に基づく、ひずみ補償理論を採用する。

これは、同一土質、同一形状のモデル・テストの結果を、土質・形状

この方法は、1971年以來 B. P. Verma, L. Schaffer 両氏が中心となって展開してきている、ひずみ補償理論^{53)~56)}である。実物とモデルに「同一の土壌」を与える場合、予報係数は縮尺比の関数として表わすことができるとするものである。ここで、同一の土壌とは、唯単に同じ土壌を用いるということの意味するだけではなく、実物とモデルの両系に全く同じ強さをもつ土を与えることを意味している。具体的には、同一土壌で同一深さにおいて実物とモデルを実験する方法が採用される。両氏の⁵⁷⁾実験ではチゼルを用い、田中氏の実験⁵⁷⁾では水平けん引の円錐体を使って、上記理論がよく成立することを証明している。また、上記理論を更に一般化する目的で“Vector length”の概念を土-機械系に導入したひずみ補償理論が B. P. Verma 氏等によって発表されている。⁵⁸⁾ Vector length の方法は、1951年 H. E. Huntly が発表⁵⁹⁾したものであり、従来の基本次元 M, L, T または F, L, T に対し、 L を互いに直交する3軸方向について L_x, L_y, L_z に分離し、各々を基本次元とするものである。B. P. Verma 氏等は、プラウと排土板について、この Vector length に基づくひずみ補償理論を実験を通じて実証している。

さて、種々の土の因子を選定し、多くの実験が重ねられてきたにも拘らず、ii)の方法による場合は予測精度の点で不満足であり、iii)の方法には二つの制約があると考えられる。その制約の一つは、同一深さで実験できる機具はチゼルや暗きよ工法に用

いられる弾丸等に限られ、広く一般の機具に適用できない。今一つは、たとえ、Vector length の方法を採用する場合でも、深さ方向の縮尺比のみを1、すなわち、実物もモデルも高さに関する限り同一寸法とするのでは、真にモデルとしての効用が乏しい事である。

次に、大部分の実験が土壌槽を用いて行なわれるため、実験に供する土の準備操作に関する研究がある⁶⁰⁾。土の状態をできる限り一定に保ち、水平方向、垂直方向に均一、均質な条件を得るため種々の方法が試みられているが、米国の陸軍水路研究所(WES)の報告⁶¹⁾に代表されるように、現在のところ良い方法はない。特に、同一土壌におけるモデル・テストの実施に関しては、自然土壌を対象とする限り多くの問題を含んでいる。そうした背景を持って注目されてきたものが人工土である。

人工土に関する研究は、自然土壌に匹敵する土質力学的特性を持つ人工土の組成に関するもの、温度・湿度に対する特性変化および土壌槽実験への適応性を調べたものに分けられる。その結果、粘土、砂の鉱物粒子と種々のオイル類を組合せて、十分自然土壌に近似した土質力学的特性を持ち、しかも自然土壌の持つ欠点を補う人工土の調製ができ、人工土利用による実験結果が高く評価されている。

Ⅲ. 土-機械系の相似性に関する実験

§1 実験の概要

土-機械系の相似性に関する研究対象は、前節において概観したように種々様々であるが、それらの系に生じている現象を通じて機械が土に働きかける基本的な3態を本研究の実験対象として選定した(図.3-1)。

すなわち、唯単に、平板が土中をけん引される状態の系(第1系と称し、平板を排土板と記述する)、第1系に垂直荷重が加えられた系(第2系と称し、トラック・シューと記述する)および回転切削作用を持つ系(第3系と称し、ロータリと記述する)の3態である。

以上の機械系に、実験に供試した土の種類を組み合わせると、表3-1に示すものが実験の全貌である。なお、人工土利用による第3系、人工土-ロータリ系の実験に着手する前に、人工土の調製方法およびその性質について予め把握しておく必要があった。したがって、相似性に関する一連の実験として、本論文に記載したことをおこしわりしておく。

§2 実験〔1a〕——乾燥砂—排土板系——

1 目的

土中において2個の相似形状を持つ排土板をけん引すると、各排土板は土の抵抗を受ける。いま、大きな寸法を持つ排土板を実物 (Prototype)、小さな排土板をモデル (Model) とすると、モデルの受ける土の抵抗を測定し、その値から実物への土の抵抗を予報できれば、モデル試験法が確立する。そのためには、モデルに与えるべき相似条件が真に両系間の相似性を保障できるものでなければならない。したがって、土の因子を含め、本実験が設定した相似条件下で、幾何学的に相似な排土板をけん引し、各排土板間に相似性が成立するか否かを明らかにすることが主目的である。

本実験は最初に行なわれたこともあり、土の中でも取扱いが比較的容易であると考えられた乾燥砂を用いた。そして、相似性成立の有無に注目するほか、けん引抵抗とその因子との関係について調べることを目的とした。

2 相似条件の誘導

乾燥砂中における排土板への抵抗に関係する因子として選定した諸量を表3-2に示す。因子のうち、 α は排土板前面とけん引方向とのなす角度であり、これをけん引角と呼ぶことにした。砂に関する因子の選定に際しては、従来の研究結果²⁰⁾を参考にして、 ρ および μ 中に限定した。

表3-2 乾燥砂-排土板系の関係因子

因子名	記号	次元
排土板 高さ	h	L
中	b	L
その他の長さ	l	L
けん引角	α	-
けん引速度	v	$L T^{-1}$
けん引抵抗	D	$M L T^{-2}$
砂 密度	ρ	$M L^{-3}$
内部摩擦角	ϕ	-
その他 重力加速度	g	$L T^{-2}$

いま、けん引抵抗 D とその他の因子との間に次式が成立するものとする。

$$D = f(h, b, l, \alpha, \rho, \phi, g, v) \dots\dots\dots (3-1)$$

この関係式を、Buckingham の Π Theorem より、無次元量で書き直してみる。次元マトリックスは次の通りである。

	D	h	b	l	α	ρ	ϕ	g	v
M	1	0	0	0	0	1	0	0	0
L	1	1	1	1	0	-3	0	1	1
T	-2	0	0	0	0	0	0	-2	-1

この次元マトリックスの階数は

D, g, v の各行について、

$$\begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ -2 & -2 & -1 \end{vmatrix} = 1$$

となり零とはならないから、階数は3である。よって、因子総数から階数を差し引いた $9-3=6$ 個の無次元量が求められる。無次元量を求める計算方法は前章に記したように機械的なものであり、参考図書もあるため^{4), 48), 62)~64)}、ここでは省略する。

計算の結果、次の無次元量が得られた。これらを、以後、 Π 項 (Π Term) と記す。

$$\left. \begin{array}{l} \Pi_1 = \frac{D}{\rho g b^3}, \quad \Pi_2 = \frac{v^2}{g l}, \quad \Pi_3 = \frac{h}{b} \\ \Pi_4 = \alpha, \quad \Pi_5 = \phi, \quad \Pi_6 = \frac{l}{b} \end{array} \right\} \dots\dots (3-2)$$

(3-2) 式の Π 項を用いて、(3-1) 式を書き表わせば、

$$\Pi_1 = F(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6) \dots\dots\dots (3-3)$$

となる。(3-2) 式中、 $\Pi_2, \Pi_3, \dots, \Pi_6$ がこの実験における相似条件である。すなわち、次の条件を満足する場合には、実物・モデル両系に相似性が成立することが期待される。ただし、今後、添字 m はモデルを意味する。

$$\left. \begin{array}{l} \frac{v^2}{g l} = \frac{v_m^2}{g_m l_m} \\ \frac{h}{b} = \frac{h_m}{b_m} \\ \alpha = \alpha_m \\ \phi = \phi_m \\ \frac{l}{b} = \frac{l_m}{b_m} \end{array} \right\} \dots\dots\dots (3-4)$$

(3-4)式で示される条件を満足するとき,

$$\frac{D}{\rho g b^3} = \frac{D_m}{\rho_m g_m b_m^3} \dots\dots\dots (3-5)$$

という予報式が成立する。相似条件のうち, Π_2 は $g = g_m$, $l/l_m = \pi$ (縮尺比) とすれば, 両系に与えるべきけん引速度の関係を示し, Π_3 および Π_6 は両系の排土板が相似形状であるべき事を条件づけている。 Π_4 は, けん引される排土板のけん引角を等しくすればよいことを示し, Π_5 は 含水比などの変化を砂に与えなければ, 自ずから成立していると考えることができる。

3 実験方法

1) 供試排土板

表3-3 および表3-4 に示すように, 高さとの比が0.5で, 大きさの異なる6種類の排土板と, 中は一定とし高さを覚えて, その比率が0.2から1.0に亘る排土板5種類を製作した。

表3-3. 供試排土板(I)

($h/b = 0.5$)

h (cm)	b (cm)
5.0	10.0
6.5	13.0
7.5	15.0
10.0	20.0
12.5	25.0
14.0	28.0

表3-4. 供試排土板(II)

($h/b = 0.2 \sim 1.0$)

h (cm)	b (cm)	h/b
3.0	15.0	0.2
6.0	15.0	0.4
9.0	15.0	0.6
12.0	15.0	0.8
15.0	15.0	1.0

実験の目的に対応して、前者の排土板群は相似性実験のために、後者は排土板けん引抵抗とその形状との関係を調べるためのものである。相似性成立の有無を検討するためには、これまで、実物とモデルという語を用い各々その数は1個ということを前提に述べてきたが、本実験では最も大きな寸法を持つ $h=14.0$ cm, $b=28.0$ cm の排土板を実物、その他5枚の排土板をモデルと考える。モデルの数が多いことは実験回数が増し、それだけ多くの労力と時間を必要とするが、逆に実験結果の信頼性は増すことになる。

排土板はすべてその前面が平面であり、実際のブルドーザの排土板のような曲面ではない。供試排土板(I)の厚さや表面粗度などは、厳密には(3-4)式の T_0 の条件から縮尺比 n に合わせてその寸法を決定し製作すべきであるが、それらのけん引抵抗に及ぼす影響は微小であると考え、厚さはいずれも5mmとし、同一鋼板を使用した。排土板(I)、(II)の区別なく、その板の最下端の切削刃に相当する部分に 60° の切削逃げ角を与えた。

2) 供試砂

実験に供試した砂は、セメントの強度試験に用いられる標準砂といわれる非常に粒度のよく揃ったものである。山口県豊浦郡の豊浦海岸に産し、297ミクロンの篩により夾雑物を除去したものと解説されている。⁶⁵⁾

実験期間を通じて、石の水分の変動は少なく含水比にして 0.12～0.17% であった。また、真比重は 2.65、有効粒径は 0.16 mm である。容器 (30 × 30 × 20 cm) を用いて充填密度を測定した結果、最も粗の状態では 1.284 g/cm^3 、密の状態では 1.442 g/cm^3 であった。

3) 実験装置および測定

図 3-2 に実験装置の概略図を示す。木製の土壌槽の長辺枠上にレールを敷設し、その上に排土板を取り付けた台車をのせ、ロープを介してけん引した。巻取りドラムを交換することによって、けん引速度を変える方法を採用した。台車の下腹部に取り付けた排土板への抵抗により、台車には進行方向に回転モーメントを生じ、後車輪の浮き上りやひいては前方へ転倒するおそれがある。そこで、台車と後部に重錘 (20～100 kg) と載せ、回転モーメントに十分対抗させる方策を講じた。したがって、排土板けん引抵抗は、排土板を取り付けない状態の台車のけん引抵抗を差し引いた値である。

けん引抵抗の測定はストレイン・ゲージ利用の張力計を用い、けん引速度は台車車輪の $1/4$ 回転 (進行距離にして 6.25 cm) をマイクロスイッチを利用して、いずれもオシログラフ (横河電機株式会社製 EMO 221 型) に記録した。なお、本研究を通じて用いたストレイン・メータは共和電業株式会社製 DPM 型である。

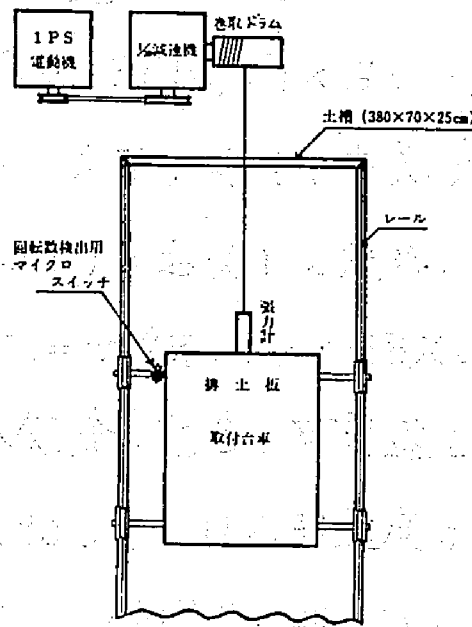


図 3-2. 実験装置

4) 実験条件

i) 砂の準備

砂の充填密度が粗の状態と密の状態を準備し、実験に供した。前者の状態を作り出すためには、土壌槽中の砂を全層に亘って手操作のショベルにより十分攪拌する方法を採り、後者の場合には、前者と同じ操作を施した後、均平にし柄の付いた突固め板 (30×15 cm) により、出来る限り均等に砂表面と突き固めた。両者の場合とも各操作が終わった後、均平板を取り付けた専用の台車をレール上に走らせて、表面を均らした。

実験時の土壌槽中の砂の密度を随時サンプリングして測定したところ、粗の状態では 1.310 g/cm^3 、密の状態では 1.381 g/cm^3 が平均値として得られた。

ii) けん引速度の設定

相似条件の誘導の項において述べたように、けん引速度の決定方法は、まず、実物（本実験では、 $n = 14.0 \text{ cm}$, $b = 28.0 \text{ cm}$ の排土板）の速度 v を定め、それに対して各モデルの速度 v_m を、 $v_m = v/\sqrt{n}$ (n は縮尺比) として算出される。

しかし、本実験の場合、可変速モータの入手できない事情があったことに加えて、けん引速度の設定範囲が低速度領域であることを考慮し、供試排土板 (I) には 5, 9, 12, 16 (cm/sec) の4段階、供試排土板 (II) に対しては 5, 9 (cm/sec) のけん引速度を設定した。完全な相似条件を与えることのできなかった $\Pi_2 = v^2/(gl)$ の、けん引抵抗 D を含む $\Pi_1 = D/(\rho g b^3)$ への影響については、実験結果の考察の項において検討を行なう。

iii) 排土板の取付状態 (図 3-3)

排土板は、砂表面に鉛直になるように、台車に取り付けられ、排土板上端が砂表面と一致する位置で固定された。けん引角 α は 90° , 75° , 60° , 45° の4段階とした。

以上の条件を総合すると、本実験の組合せは表 3-5 の通りである。

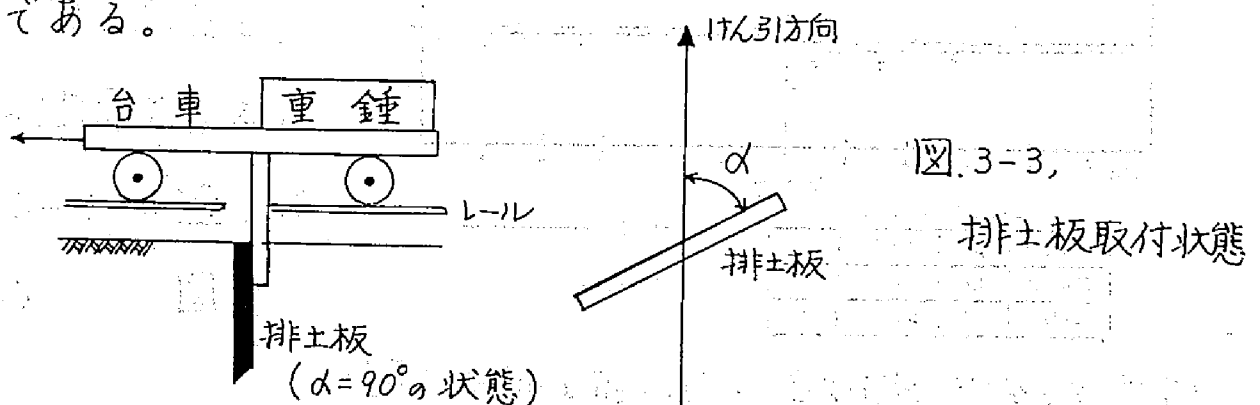


表 3-5 実験の組合せ

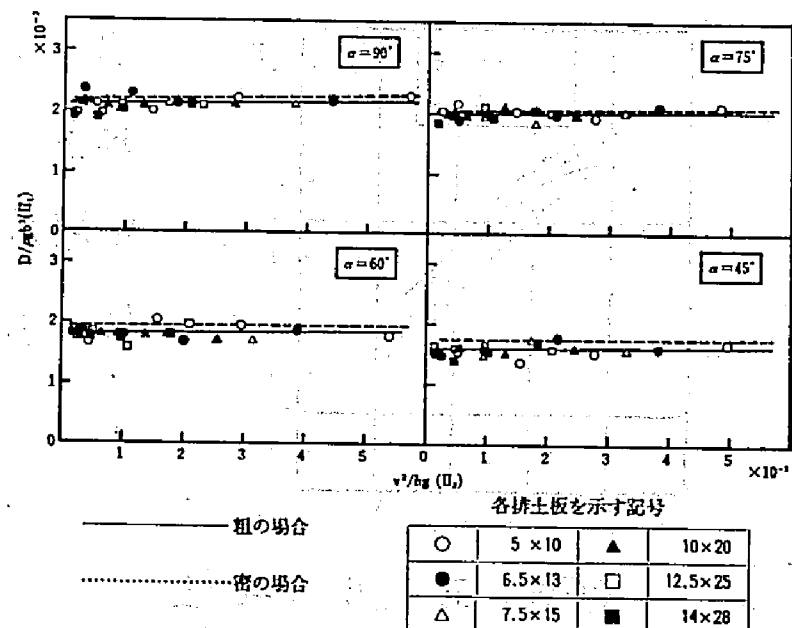
排土板系	砂の状態	けん引角	けん引速度 (cm/sec)
[I]	粗	90°, 75°, 60°, 45°	5, 9, 12, 16
	密	90°, 75°, 60°, 45°	5, 9, 12, 16
[II]	粗	90°, 75°, 60°, 45°	5, 9
	密	90°, 75°, 60°, 45°	5, 9

4 結果および考察

1) 乾燥砂-排土板系の相似性

前述したように, (3-4)式で示される相似条件のうち, Π_6 については, その Π_2 に及ぼす影響は微小と考え無視できるものとし, Π_3 , Π_4 および Π_5 については, 実物とモデルの排土板群 (I) に等しく条件を与えたことになる。しかし, Π_2 については, 実験装置の関係で各排土板に同じ値を与えることができなかった。

以上の条件下で行なわれた実験の結果から, Π_1 と Π_2 の値を算出し, その関係を見ると, 図 3-4 の通りである。 図中,

図 3-4, Π_1 と Π_2 の関係 (各点は粗の場合のみを示す)

排土板符号で打突してあるのは、砂が粗の場合であり、密の場合は鎖線のみで示してある。図より、 π_1 は π_2 に関係なくほぼ一定であることがわかる。但し、その π_1 の値は砂の状態およびけん引角 α により差を生じている。すなわち、砂が粗の場合より密の方が、 α が大きいほど π_1 値は大きいと言える。

π_2 の値に関係なく、各排土板の π_1 の値に差がなくほぼ一定値を示すということは、(3-3)式がすべての場合に成立したことを意味する。換言すれば、相似性が成立するのを確認できた訳である。

$D/(\rho g b^3) = k(\text{constant})$ とおけば、 $D = k \rho g b^3$ となり、少なくとも本実験に関する限り、排土板抵抗はその一辺の長さの3乗に比例すると言える。

2) けん引抵抗とけん引角との関係

6枚の相似排土板はけん引速度に関係なく、ほぼ同じ π_1 値を示すが、それらの平均値を、砂の状態およびけん引角との関係において、図3-5に示す。

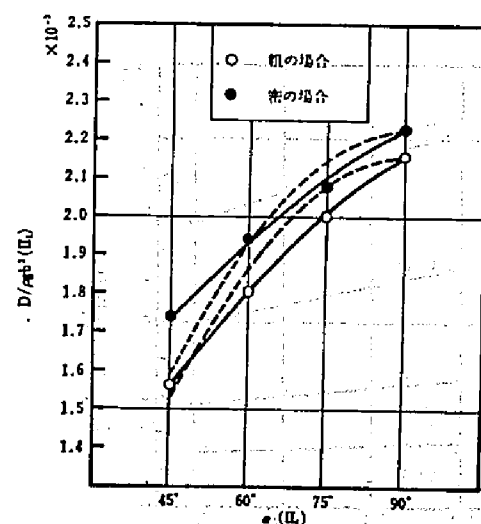


図3-5, π_1 と π_4 の関係
(実線は α が90°を基準とする正弦波を示す)

α が小さくなるほど当然抵抗は減少するが、その減少の度合は、砂の状態が密の場合より粗の方が急である。今、単純に排土板の相対する排土量が直接けん引抵抗に比例するものと考え、 $\alpha = 90^\circ$ を基準として算出される Π_1 値を求めると図中鎖線で示されるような正弦曲線で表わされるが、測定値に基づく曲線とは殆んど合致しない。排土板前面下のくさび (Wedge) および翼 (Wing) 部分の形成状態が α によって異なるからである。

以上のように $h/b = 0.5$ という排土板群間には相似性が成立したが、これは h/b が変わっても相似形状を持つ排土板群の間には相似性は成立すると考えてよい。では次に、 h/b を変えた場合には Π_1 値はどのようなになるかを検討してみる。

3) けん引抵抗と排土板形状との関係 (Π_1 vs Π_3)

表 3-4 に示した縦横比の異なる排土板 (II) を用い、けん引角 α を変えて実験した結果は図 3-6 の通りである。 α の

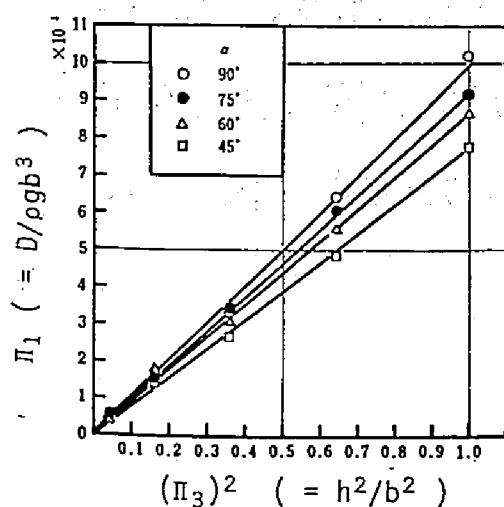


図 3-6, Π_1 と Π_3 の関係
(密の場合)

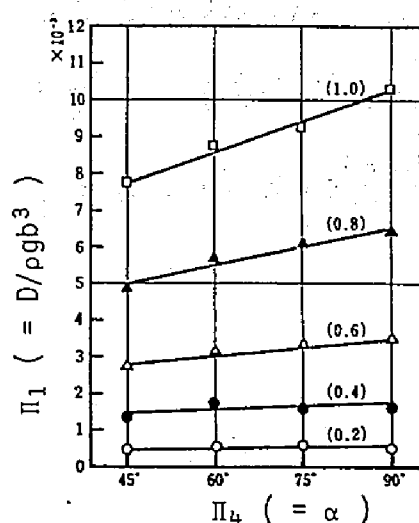


図 3-7, Π_1 と Π_4 の関係 (密の場合)
() 内は h/b の値を示す。

犬小に拘わらず、 π_1 は π_3 の2乗と直線関係にある。しかも、 α の大きいほど π_1 の増加率は大きく、また、図3-7のように、縦横比の値が大きくなるにしたがって、 α の影響が顕著である。

5 要約

乾燥砂中における排土板抵抗に関係する因子を選定し、次元解析によって相似条件を求めた。実験の結果、次の諸実が判明した。

- 1) 相似形状を持つ排土板間に動力学的相似性が成立することが実験を通じて確認された結果、本実験での関係因子の選定が適切であることが明らかである。
- 2) 本実験で設定した π_2 値の範囲では、けん引速度はけん引抵抗にほとんど影響しないと言ってよい。
- 3) 排土板抵抗はその一辺の長さの3乗に比例する。
- 4) 排土板けん引角 α および b/a を決めれば、 π_1 は一定値を示すが、その π_1 値は α とともに減少し、 $(b/a)^2$ に比例する。
- 5) b/a の値が大きいほど、 α による π_1 値の増減が顕著である。

§3. 実験〔1b〕 砂質ローム-排土板系

1. 目的

これまでも述べてきたように、モデルから実物についての有効な情報をうるには、モデル系に与えるべき相似条件が適正でなければならない。相似条件のうち、機械の方与えるべき製作上の設計条件や、どのように作動させればよいかという運転・操作条件については比較的容易に達成できる。

しかし、機械の対象とする土の条件はいかにあるべきか、その条件を満足させるためには土にどのような準備操作をすべきか、またその条件を満足させることができないのであれば、その場合のひずみをどのように修正すれば実物についての情報に結びつくのであろうか等々の諸問題が生じてくる。実験〔1a〕の乾燥砂を対象とした場合には現われなかった上記の諸点について、真向うから取り組もうとするのが本実験の主旨であり、その具体的なねらい、特徴となる点は以下に解説する通りである。

(1). 新しい土因子導入の試み

従来の研究においては、種々の土因子が当該系の現象に関係するものであるとして選定され、実験を通じて検討がなされてきた。その中でも、土の内部摩擦角中、粘着力およびコーン貫入抵抗を関係因子として採用しているものが多い。また、採用されないまでも、供試土の状態を普遍化して記述する際に

用いられることが多い。

本実験を遂行するに当たっても上記の理由から、 c 、 ϕ を測定する必要性はあったのであるが、肝心のせん断試験機が入手できず、それを果すことができなかった。また、最もよく使用されている、頂角 30° 、底面積 $\frac{1}{2} \text{ in}^2$ の標準型コーンは、本実験のように高水分の土をも対象とする場合には、その貫入抵抗値がきわめて小さく、測定誤差の影響が大きくなるため、不適当であることが予備実験の段階で判明した。

以上の事情により、従来の方法による土因子の測定が不可能になったが、そのことが逆に本実験において新しい土の因子を導入させる契機となった。円板貫入抵抗および基準板抵抗と称するものがそれである。

1) 円板貫入抵抗

コーンの代りに直径 48 mm 、厚さ 5 mm 、底面積 18.1 cm^2 の円板を貫入体として用いた。その理由は泥土状の土壌条件下においても十分な精度を以って貫入抵抗を測定できるということに加えて、円板の貫入現象はコーンの貫入現象以上に本実験の対象である排土現象と類似性 (Analogy) を持っていると考えられるからである。すなわち、コーンの貫入抵抗はコーンと土の摩擦抵抗およびコーンによる土の圧縮抵抗より成るのに対し、円板の貫入過程においては円板下に土の円錐体が形成されるから、その円錐体について土相互の摩擦抵抗、せん断抵抗、圧縮

抵抗が円板貫入抵抗の主成分であって、円板と土との摩擦抵抗の全抵抗に占める比率は極く小さいと考えられる。矩形平板である排土板による排土現象においても、水平・垂直と方向の違いはあるものの円板の貫入現象と同じように、排土板面前方に三角形のくさび (Wedge) が形成され、その側方の翼部 (Wing) においては土相互の摩擦・せん断・圧縮の各現象が生じ、排土板面上を土が流動するため生ずる摩擦抵抗は微小である。

円板を貫入体として選定した理由は上述の通りであるが、円板貫入抵抗線図からいかなる値を以って土の強さ因子とするかについては、次のような考え方に基いている。

従来、貫入抵抗を以って土の因子とする場合、図 3-8 に示すように、ある一定の貫入深さにおける抵抗値 P_1 あるいは地表からある貫入深さまでの平均貫入抵抗値 P_2 が採用されている。すなわち、実物、モデルの如何を問わず、また機具の作用深さに関わりなく、実験に準備された土の、たとえば、貫入深さ 10 cm における P_1 または、 P_2 の値をその土の強さ因子として用いている。これに対して、本実験では、貫入抵抗に関して、次の 2 種類の土の因子を選定した。

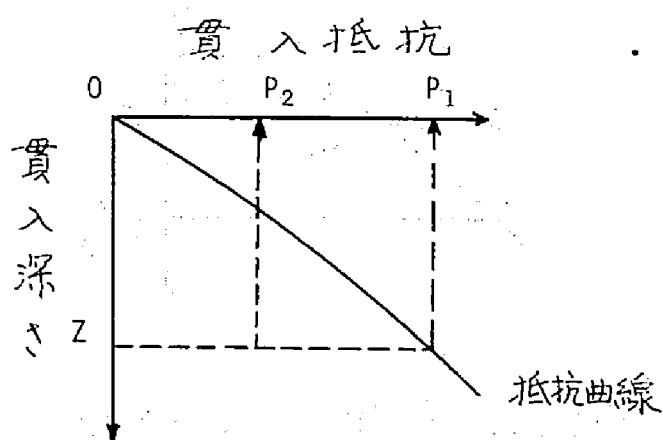


図 3-8, 従来採用された貫入抵抗

i) 円板貫入抵抗 R

図3-9に示すように各排土板の作用深さに相当する貫入深さにおける貫入抵抗を以ってその各実験に用いられた土の強さ因子とするものである。これは、一定の貫入深さでの貫入抵抗を土の強さ因子とする従来の方法とは異なっている。

ii) 円板貫入抵抗 Q

図3-10に示すように、土壌表面から各排土板の作用深さに相当する貫入深さに至るまでの貫入抵抗の積分値である面積を以って、その土の強さ因子とするものである。貫入抵抗線図上の1点の抵抗値を土の強さ因子とする場合、土壌の垂直方向の強さの不均一によりその抵抗値が大きな影響を受けるのに対し、この円板貫入抵抗 Q は各排土板の作用深さ全域に亘る土の強さの尺度を与えてくれるという利点を持つものと考えられる。

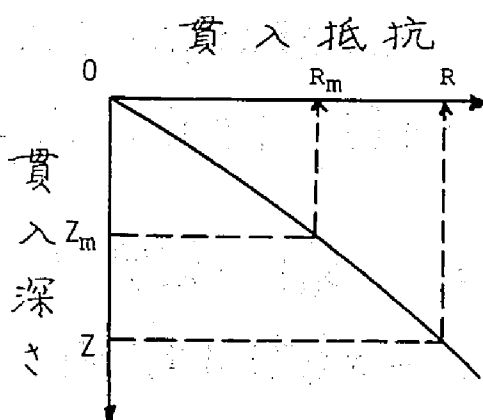


図3-9, 作用深さに対応した貫入抵抗

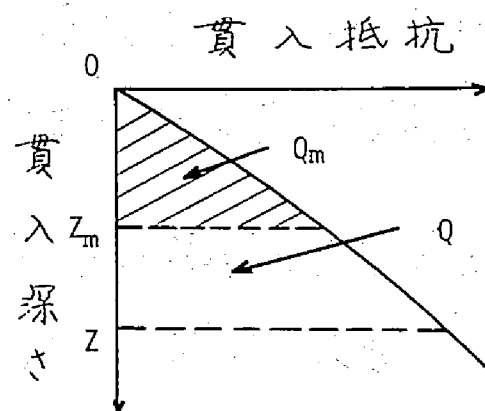


図3-10, 作用深さに対応した貫入抵抗の積分値

2) 基準板抵抗 S

基準板と称しているものは、長さ 300mm 、巾 38mm 、厚さ 5mm 、排土板と同じ材質の平鋼である。基準板の土中部分の長さを段階的に変えてけん引し、その抵抗を求め、結果として得られる基準板抵抗—深さの関係から、各排土板の作用深さ h に対応する基準板抵抗を以って、それぞれの排土板に対する土の強さ因子の値とするものである。この方法は当該の排土現象を伴ない、表 2-2 に示した土壤測定器の分類に従えば、その特性値はⅢ. アナログに属する。

貫入抵抗 R 、 Q が土壤槽中の貫入個所の垂直方向の土の強さを示すのに対し、基準板抵抗 S は水平・垂直の両方向に亘る土の強さを反映しているという優れた点を持っていると考えられる。

以上、本実験では R 、 Q 、 S という 3 種類の土因子を選定し、それらと排土板抵抗との関係を回帰分析法により明らかにした上で、それぞれの因子を用いた場合の予報精度を検討した。

(2) 実験が対象とした土の水分領域が広範であること

供試土は砂質ローム 1 種であるが、風乾の状態から液性限界に近い状態までの間の 5 段階の含水比の土を実験の対象としている。とくに塑性限界近傍の状態については、土の準備操作に困難を伴う上に、一旦高水分の土を調製すると再び低水分

の土に復原することが至難であることから、大規模な土壌槽施設を持つ研究機関においても取扱いの容易な水分状態のみを実験対象とすることが多い。その点、幾多の困難は予想されたものの、比較的小規模な本実験施設の特色を活かして、敢えて広範囲な水分状態の土を実験対象としたことに意義、特徴がある。

(3) 多くの排土板モデルを採用していること

ひずみモデルを取扱う場合は、多くのモデルについて実験を行ない、そのひずみを検討することが精度の良い情報をうるための一方法と考えられる。本実験では6個の排土板を用いたが、6個の中から任意の2個を取り出し、サイズの大きな方を実物、小さな方をモデルと考えることにより、 $6C_2/2 = 15$ 個の縮尺比 (Length Scale) n をうることができる。したがって、 n と特性値、ひずみ係数との関係を検討する上で豊富なデータによる検証ができることになる。

反面、モデルの数を増せば、実験の組合せ数は飛躍的に増加し、唯、作業量が増えるだけではなく、実験中の土の状態の変動が不可避となるため、その数には限界がある。その点、本実験で設定した排土板モデルの数は至当である。

2. 相似条件の誘導とひずみの取扱い

排土板抵抗に関する因子として表 3-6 に示す諸量を選定した。実験 [1a] とは異なり、排土板面とけん引方向とのな

す角度が 90° の状態のみを対象としている。

表 3-6. 土-排土板系の関係因子

因 子 名	記 号	次 元
排土板 高 さ	h	L
中	w	L
けん引抵抗	D	$M \quad L \quad T^{-2}$
けん引速度	v	$L \quad T^{-1}$
その他		
重力加速度	g	$L \quad T^{-2}$
土		
密 度	ρ	$M \quad L^{-3}$
円板貫入抵抗	R	$M \quad L^{-1} \quad T^{-2}$
円板貫入抵抗	Q	$M \quad T^{-2}$
基準板抵抗	S	$M \quad L^{-1} \quad T^{-2}$

いま, 排土板抵抗 D を (3-6) 式, (3-7) 式, (3-8) 式によって表わすものとする。

$$D = f_1(h, w, \rho, R, v, g) \dots\dots\dots (3-6)$$

$$D = f_2(h, w, \rho, Q, v, g) \dots\dots\dots (3-7)$$

$$D = f_3(h, w, \rho, S, v, g) \dots\dots\dots (3-8)$$

次元解析をすると, 次の無次元量が得られる。

$$\left. \begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{D}{\rho g w^3} \\ \Pi_2 &= \frac{v^2}{hg} \\ \Pi_3 &= \frac{R}{\rho gh}, \quad \Pi_3' = \frac{Q}{\rho gh^2}, \quad \Pi_3'' = \frac{S}{\rho gh} \\ \Pi_4 &= \frac{h}{w} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3-9)$$

(3-6), (3-7), (3-8)の各式を無次元項で示すと, 次の3式となる。

$$\Pi_1 = F_1(\Pi_2, \Pi_3, \Pi_4) \quad \dots\dots\dots (3-10)$$

$$\Pi_1 = F_2(\Pi_2, \Pi_3', \Pi_4) \quad \dots\dots\dots (3-11)$$

$$\Pi_1 = F_3(\Pi_2, \Pi_3'', \Pi_4) \quad \dots\dots\dots (3-12)$$

上の各式中, Π_1 以外の Π 項は実物とモデルに対して等しく与えるべき相似条件である。相似条件中, Π_2, Π_4 については, 実験〔1a〕において説明したように問題は生じない。しかし, Π_3, Π_3', Π_3'' については, いずれもひずみの生起を考えなければならない。なお, 以後の文中, 添字 m はモデルを示す。

1) Π_3 の場合

実物とモデルに対して同一の Π_3 を与える場合, すなわち, $\Pi_3 = \Pi_{3m}$ とするためには,

$$\frac{R}{\rho g h} = \frac{R_m}{\rho_m g_m h_m} \quad \dots\dots\dots (3-13)$$

であり, 同一の土において実物とモデルを実験する場合, $\rho = \rho_m$ となり, $g = g_m$, $h/h_m = n$ (縮尺比)を用いて(3-13)式を整理すれば,

$$R_m = \frac{R}{n} \quad \dots\dots\dots (3-14)$$

を得る。この(3-14)式は, 土の強さ因子を円板貫入抵抗値 R (kg/cm^2)とする場合, モデルに対して準備すべき土の強さ R_m は実物に用いる土の強さ R の $1/n$ にすべきことを意味している。

そして、各相似条件が実物とモデルに対して等しく与えられるならば、すなわち

$$\left. \begin{aligned} \Pi_2 &= \Pi_{2m} \\ \Pi_3 &= \Pi_{3m} \\ \Pi_4 &= \Pi_{4m} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3-15)$$

が成立するとき、次の予報式が得られる。

$$\Pi_1 = \Pi_{1m} \dots\dots\dots (3-16)$$

ここで、相似性が認められた乾燥砂の場合について見てみる。乾燥砂における円板貫入抵抗線図は、図3-11に示すように、貫入深さにほぼ比例して貫入抵抗が増加し、直線近似できる。図より明らかなように、(3-14)式は成立し、乾燥砂では(3-10)式で示される相似条件がすべて満足していたことを意味している。

次に、一般の土壌については、(3-14)式で示される相似条件を実現することは不可能である。貫入抵抗線図は直線とはならず、ひずみモデルとなる。ひずみ係数 α_R 、予報係数 δ を次式によって定義する。

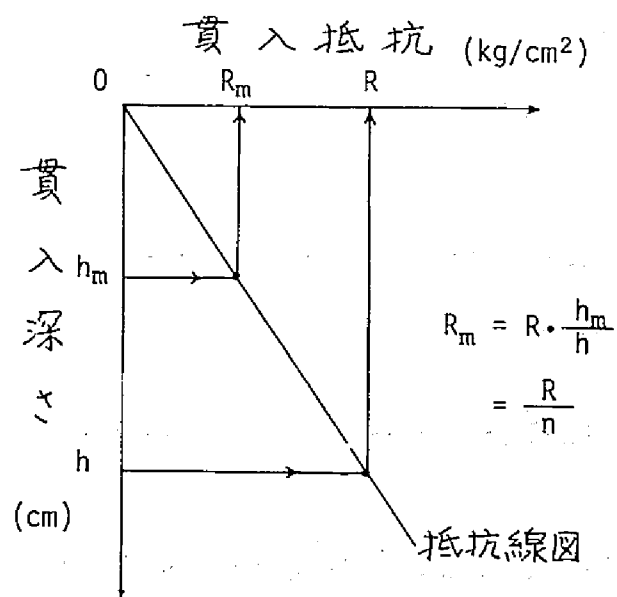


図3-11, 円板貫入抵抗線図
(乾燥砂)

$$\Pi_{3m} = \alpha_R \cdot \Pi_3 \quad \dots\dots\dots (3-17)$$

$$\Pi_1 = \delta \cdot \Pi_{1m} \quad \dots\dots\dots (3-18)$$

2) Π_3' の場合

$\Pi_3' = \Pi_{3m}'$ とするためには,

$$\frac{Q}{\rho \cdot g \cdot h^2} = \frac{Q_m}{\rho_m g_m h_m^2} \quad \dots\dots\dots (3-19)$$

となるから, 両系に同じ土を用いる場合, 次式が成立する。

$$Q_m = \frac{Q}{n^2} \quad \dots\dots\dots (3-20)$$

この (3-20) 式で示される相似条件は, Π_3 の場合と同様に乾燥砂では成立するが, 一般の土壌については実現が不可能である。よって, ひずみモデルとなるから, 前項と同じように, ひずみ係数を次式で定義する。

$$\Pi_{3m} = \alpha_Q \cdot \Pi_3' \quad \dots\dots\dots (3-21)$$

3) Π_3'' の場合

$\Pi_3'' = \Pi_{3m}''$ とするためには,

$$\frac{S}{\rho g h} = \frac{S_m}{\rho_m g_m h_m} \quad \dots\dots\dots (3-22)$$

同一の土においては,

$$S_m = \frac{S}{n} \quad \dots\dots\dots (3-23)$$

が成立しなければならない。しかし, 一般の土壌では上式の条件を満足する土をモデルに対して準備することは不可能であり, ひずみモデルとなる。ひずみ係数を次式で定義する。

$$\Pi_{3m}'' = \alpha_s \cdot \Pi_3'' \dots\dots\dots (3-24)$$

以上、定義した α_R , α_Q , α_s と δ との関係を実験によって求め、どの因子を用いればモデルから実物についての、より高い精度の予報がなされるかを検討する。なお、ひずみの取扱いの一方法である重力加速度を関係因子から除去する場合および土の因子を実際上は含めない場合についての考察も併せ行なった。

3 実験方法

供試排土板は実験〔1a〕において使用したものであるが、今後、各排土板を記号で指示する必要があることから、表3-7に再掲する。実験装置および測定方法は、実験〔1a〕と同じである。

表3-7, 供試排土板

排土板 記号	h (cm)	b (cm)
I	5.0	10.0
II	6.5	13.0
III	7.5	15.0
IV	10.0	20.0
V	12.5	25.0
VI	14.0	28.0

1) 供試土壌

供試土壌は京都大学宇治構内で採取してきた砂質ロームであり、採取後、屋外コンクリート上において自然乾燥させた後、粉碎・篩別を施して用意した。

その粒径分析結果および塑性・液性限界は、図3-12に示す通りである。

実験には、水を加えてゆく方法により、水分を5段階、締固めによる密度の段階を組合わせ、計7段階のコンシステンシの土の状態を対象とすることを決定した。表3-8はそれら供試土の概要を示すものであるが、以後表中の記号を以って各土を指名することにする。なお、実験を含水比の少ない土Aから開始し、段階を追って高含水比の土Gまで行なったのであるが、加水作業に際しては、所定の水量をできる限り均等に散水し、簡単な混和操作の後、十分な時間表面をビニールシートにより被覆し、土中の水分の均一化を計った。

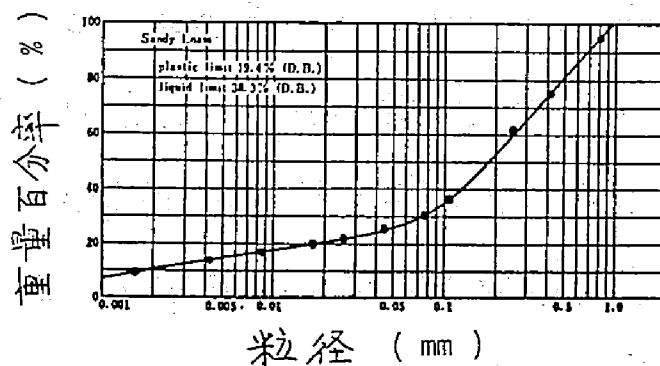


図 3-12,

粒径加積曲線

sandy loam

plastic limit 19.4 % (D.B.)
liquid limit 38.3 % (D.B.)

表 3-8, 供試土概要

土	記号	含水比* (D.B. %)	密度* (g/cm ³)	状 態
砂質ローム	A	2.50	1.204	自然風乾, 粉体状, 流動性大。
	B	2.50	1.264	
	C	16.7	1.008	フワフワ, 圧縮性大, 扱いよい。
	D	23.3	1.728	粘着性大, 流動性ほとんどなし, 扱いにくい。
	E	23.3	2.060	
	F	27.0	2.010	D, E と G の中間, 扱いにくい。
	G	30.0	2.200	粘着性はあるが, 流動し, しろかき直後の土に近い。

* 表土約10cmの深さまでの土を採取し、測定した値。

2) 貫入抵抗および基準板抵抗の測定

本実験のために、可変速モータ駆動による貫入抵抗測定装置を製作した。貫入棒先端に取り付ける円板は直径48 mm、厚さ5 mmの鋼鉄製である。貫入抵抗の測定にはストレーン・ゲージを、貫入深さには差動トランスを利用した。可変速モータにより、貫入速度を任意に変えることができる。

次に、基準板と称しているものは、長さ300 mm、幅38 mm、厚さ5 mmの寸法の、供試排土板と同材質の平鋼であり、その下端の刃部の切削逃げ角 60° も排土板と同様にしたものである。この基準板のみを排土板と同じ鉛直の姿勢で台車に取り付けてけん引し、その抵抗を測定した。基準板抵抗は、その得られた抵抗から台車自体のけん引抵抗を差し引いたものであり、基準板の土中部分の長さ（以後、作用深さと記す）を種々の段階に変えることにより、基準板抵抗と作用深さに関する結果を得た。基準板抵抗—作用深さの関係から、各排土板の高さに相当する作用深さにおける抵抗 S (kg/cm^2)を以って、それぞれ排土板に対応する土の強さ因子の値としたものである。

この基準板抵抗 S は、本実験の目的の項で述べたように、この実験を特徴づけるものであり、従来の土因子と異なるユニークな点は前述の通りである。

4. 結果および考察

1) 動力学的相似性 (π_1 と π_2 との関係)

実験〔1a〕において述べた理由により、各供試土における実験結果と、 π_1 と π_2 の関係について排土板別に調べれば、動力学的相似性に関する情報が得られる。

図 3-13.(a) は比較的水分の少ない土 A, B, C の結果である。標準砂の場合に比べ、測定値に基づく各点が離散している傾向は見られるが、排土板の大きさに無関係にほぼ一本の直線に沿って位置していることから、乾燥砂におけると同様に、6枚の排土板間には動力学的相似性が成立しているとみてよい。

これに対し、塑性および液性の両限界の中間の水分状態にある土 E, F, G では、図 3-13.(b) に見られるように、各排土板別にそれぞれ直線が描かれることから、明らかにひずみを生じていることがわかる。なお、土 D, E では、排土板 V, VI への抵抗が特に大きく、重錘に打ち勝って台車前輪を中心として後部が浮上したり、一定のけん引速度が得られない事態が発生したため、実験を割愛した。

2) 円板貫入抵抗および基準板抵抗

各土に対して、原則として、排土板を取り代える毎に、円板貫入抵抗および基準板抵抗の測定を行ない、それぞれ作用深さに対する平均抵抗値を採用した。

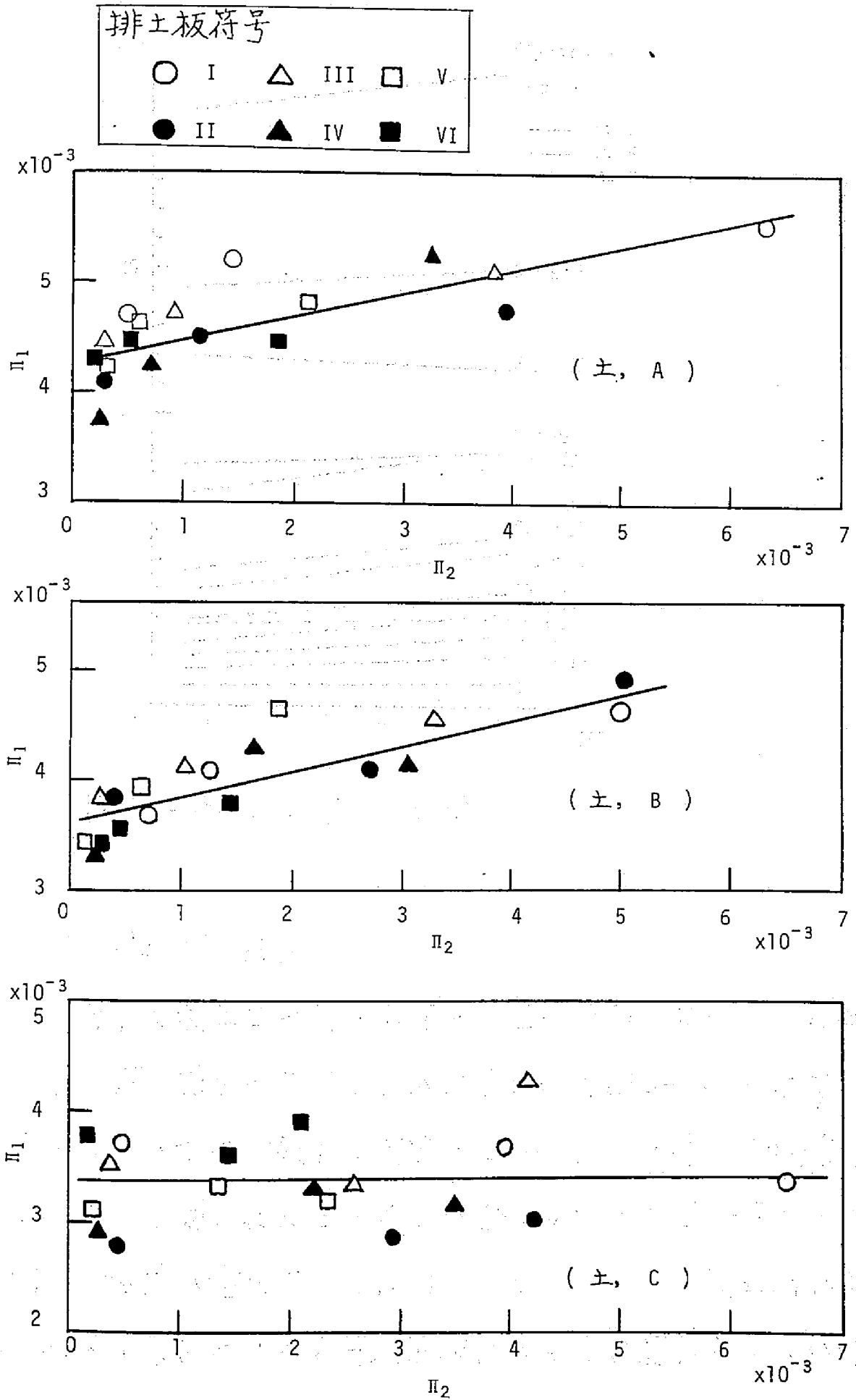


図 3-13, (a) Π_1 と Π_2 の関係

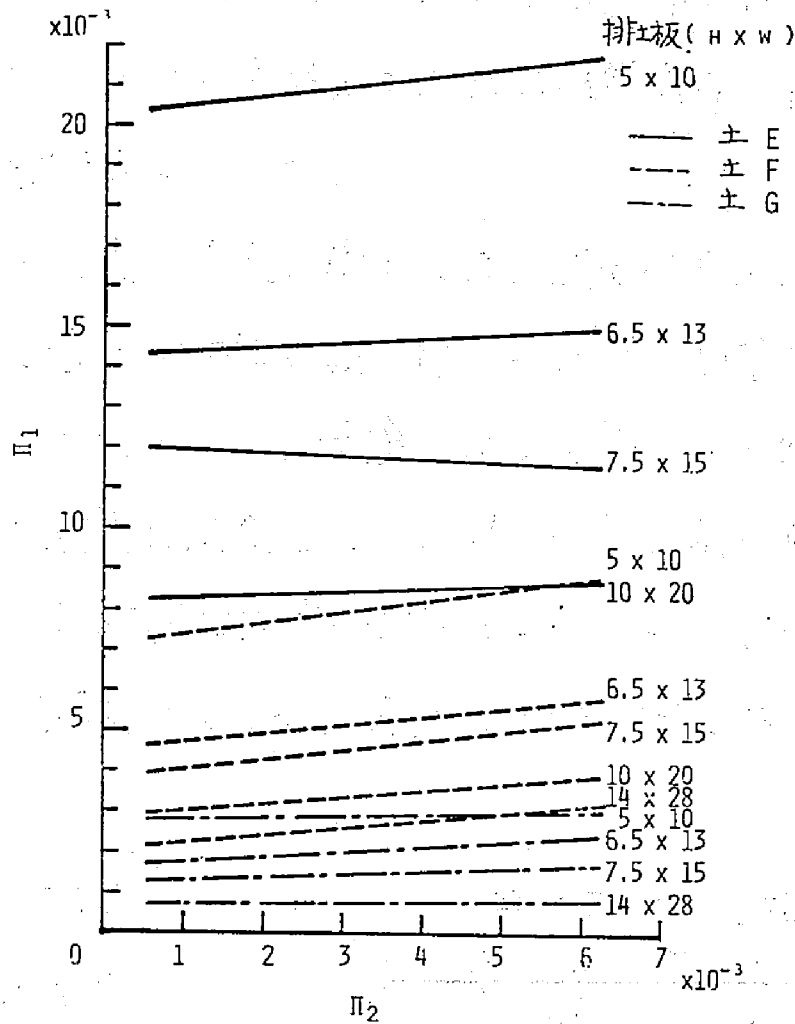


図3-13(b), Π_1 と Π_2 の関係

i) 円板貫入抵抗

均平な表土面が得られず抵抗値の変動が大きかった土Dを除き、貫入深さに対する貫入抵抗曲線を図3-14に示す。土A, B, Cについては、最小2乗法による実験式に基づく曲線で示してある。予測されたごとく、水分の少ない土では深さにほぼ比例して抵抗が増加するのに対し、土E, Fでは、表土面から5 cm以下の深さになると貫入抵抗はほとんど変わらないか(土E)、逆に減少しており(土F)、主として粘性抵抗のみが作用し

ているものと考えられる。土Fでは、深さ10cm付近から貫入抵抗は増加しているが、これは土壌槽底部の影響とも考えられるが確認できなかった。

貫入速度の決定に際しては、速度が貫入抵抗に及ぼす影響について若干の予備実験を行なったが、明確な成果は得られなかった。したがって、測莫に対して良好な0.85 mm/secという低速の貫入速度に決定した。なお、一般に用いられているコーンやプレート貫入抵抗の測定に際しても、その貫入速度と抵抗の関係が問題になるが、高速貫入時の貫入体の振動をできる限り防止すると

ともに、抵抗の測定にも十分注意を払う必要がある。

本実験に使用

した貫入抵抗

測定装置をは

じめ、一般の

装置では、低

速貫入を採用

する方が無難

と考えられる。

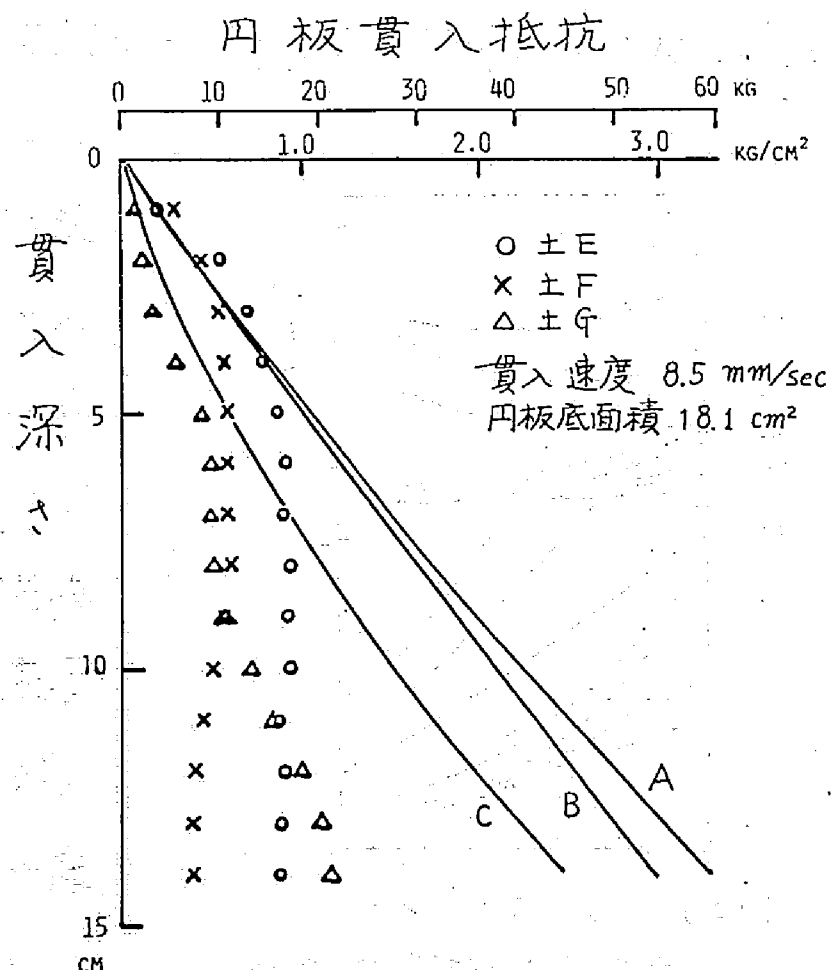


図 3-14, 円板貫入抵抗曲線

ii) 基準板抵抗

各種の土において、排土板を取りかえる毎に作用深に対する基準板抵抗の測定を行ない、その平均値(K)に基づき S (kg/cm^2) を求めた。最小二乗法によって得られた各実験式曲線を図3-15に示す。なお、図中 K は基準板抵抗そのものの値である。

作用深さに対する K の推移を見ると、土の水分が増すにつれて曲線から直線に移行する傾向がある。一方、 S は基準板の土中における作用面積(作用深さ \times 基準板の中)で K を除した量で、基準板作用面の単位面積当りの抵抗値を示している。 K 曲線とは異なり、作用深さに対する S の関係は緩やかな曲線になっている。参考例として

行なった乾燥標準砂や泥

土に近い土等ではほとん

ど平坦であるが、土A,B,

Cでは作用深さと共に S

は漸増している。粘着性

の高い土D,E,Fでは表層

土の影響が見られるが、

それ以上の深さでは一定

の傾向はない。

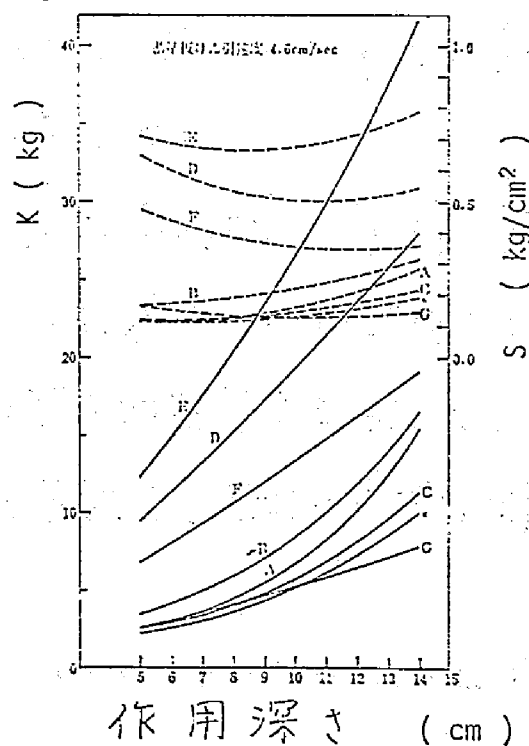


図3-15. 基準板抵抗曲線
(*印, 乾燥標準砂)

3) ひずみの取扱い

土 D, E, F, G では, 明らかにひずみを生じた。以下, ひずみの取扱いを中心に考察を行なう。

i) 重力加速度を関係因子から除去する場合

関係因子中, その影響が小さいと考えられる因子を除去することがひずみの取扱い上簡便で効果がある方法であることは, 流体力学の分野において指摘されている。たとえば, Reynolds number と Froude's number が両立しない系ではひずみが生じるが, 重力加速度を除去したり, 場合によっては粘度を削除して相似条件を求める方法が現実成功していることが多い。

土-機械系では未だ多くの適用が試みられているとは言えないが, D.F. Young が Barnes のプラウに関するひずみモデルの実験結果について, 重力加速度を除去する場合の考察を通じ, この方法が有効であることを示している。⁴⁸⁾

さて, 土の因子 R, S を選定した各場合について, 重力加速度の除去がひずみ解消にいかなる効果があるかを調べて見る。

(3-6), (3-8) 両式から重力加速度 g を除いて, 次元解析を行ない, その結果得られた各無次元量間に次式の関係が成立するものとする。

$$\frac{D}{\rho v^2 h^2} = g_1 \left(\frac{\rho v^2}{R}, \frac{h}{w} \right) \dots\dots\dots (3-25)$$

$$\frac{D}{\rho v^2 h^2} = g_2 \left(\frac{\rho v^2}{S}, \frac{h}{w} \right) \dots\dots\dots (3-26)$$

ここで, g_1, g_2 は未知関数を示す。

なお、以後の文中において煩雑を避けるため、 $Y = D/(pV^2 h^2)$,
 $X = pV^2/R$, $W = pV^2/S$ と Y, X, W の記号を以って各無次元量
 を記述する。

貫入深さに対する R および作用深さに対する S の実験式を
 求め、その式に基づいて各排土板の高さ h に対応する深さにお
 ける R および S の値を算出し、 X および W を求めた。 Y に対す
 る X, W の関係を両対数グラフにプロットして見ると、それぞ
 れ図 3-16, 3-17 の通りである。排土板別に符号分けすること
 は図を煩雑にするため省略し、土別に符号を付けてある。

図 3-13.(b) と比較して明らかなように、土の種類による差異
 がいずれも減少している。更に、排土板の符号分けがされてい
 ないにも拘らず、どの土においても排土板別の差が減っている
 ことがわかる。すなわち、図 3-16 では、各排土板が土別にほ
 ぼ一直線上に位置しており、ひずみがかなり解消されている。
 また、図 3-17 は土、排土板の種類に無関係に、この場合も一
 本の直線で示されることから、 R を土の因子として用いるより
 も S の方がひずみに関しては有効な結果が得られると考えてよ
 い。

以上は図を概観し、その特徴を述べたものであるが、回帰
 分析により Y と X , Y と W の各関係を検討する。回帰分析法で
 は、たとえば、 Y と X との間に 1 次の回帰性なしとする帰無仮
 説を立て、分散分析により 1 次の回帰性が認められたものにつ

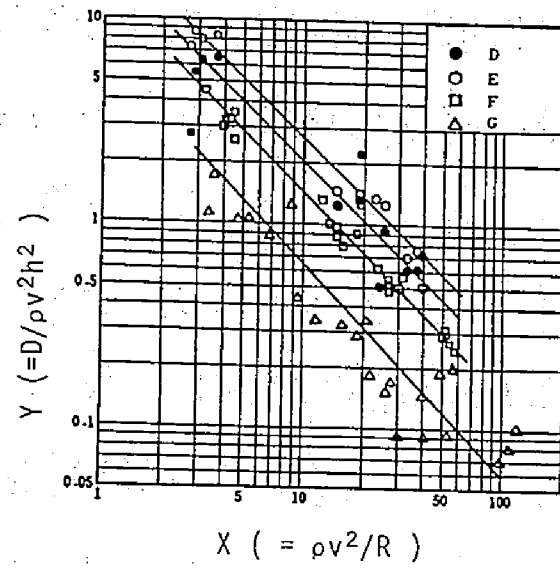


図 3-16, Y と X の関係

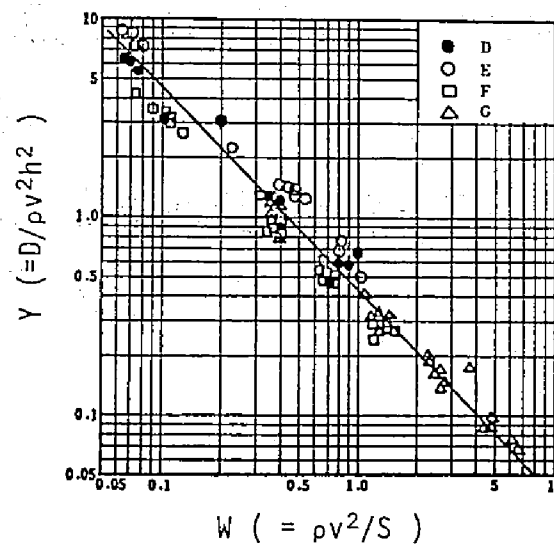


図 3-17, Y と W の関係

いては、回帰方程式の推定をするという手順をとる。⁶⁷⁾

まず、各土別に危険率1%において、 $Y-X$ 、 $Y-W$ の回帰性を調べたが、すべて1次の回帰性が確認された。次に、土D~Gの全データについての分散分析表(表3-9(a),(b))に例示するように、供試土をグループ分けしその各々の場合について同様に回帰性の検討を行なった。この場合も各土別の結果と同じようにいずれのグループも回帰性が確認された。

どの分散分析結果からも言えることであるが、回帰からの変動は $Y-X$ の方が $Y-W$ より大きく、図を一見しても明らかであるように、Sを用いた方がRの場合よりはるかに回帰性が高い。更に、このことは、表3-10に示した推定回帰方程式中のAとC、BとDを比較しても、 $Y-W$ の方が土別の差が少ないことから裏付けられる。

以上の結果、重力加速度を除去することがひずみを減少させることが判明した。

表3-9. 分散分析表

a) Y vs. X

SV #1	SS #2	DF #3	MS #4	F ₀ #5	F(0.01)
回帰による変動	18.375	1	18.375	136.5**	6.81
回帰からの変動	21.397	159	0.135		
計	39.772	160			

b) Y vs. W

Sv	SS	DF	MS	F ₀	F(0.01)
回帰による変動	38.744	1	38.744	5960.6**	6.81
回帰からの変動	1.028	159	0.007		
計	39.772	160			

#1 : Source of Variation.

#2 : Sum of Squares.

#3 : Degrees of Freedom.

#4 : Mean Square.

#5 : Observed Value.

要因

平方和

自由度

不偏分散

不偏分散比

表3-10. 推定回帰方程式

土	Y = A X B		Y = C W D	
	A	B	C	D
D	11.50	0.7897	0.4802	0.9266
E	23.92	0.9787	0.5645	0.9883
F	12.41	0.9552	0.3578	0.9536
G	3.39	0.8412	0.4007	0.9582
D~G	12.09	0.9993	0.4126	0.9910

$$Y = D / (p \cdot v^2 \cdot w^2), \quad X = p \cdot v^2 / R, \quad W = p \cdot v^2 / S$$

ii) 予報係数 δ と縮尺比 n の関係

同一の土において実物とモデルの実験を行なう際、その土の因子として、ある定数、たとえば、土質常数 C 、中またはある深さにおけるコーン、円板などの貫入抵抗値を用いて、予報係数とひずみ係数との関係を調べる。

いま、せん断試験による C 、 ϕ を例にとってみると、相似条件、 $\Pi = \phi$ および $\Pi = C/(\rho g l)$ について、土が同一であるから、

$$\phi = \phi_m \quad \dots\dots\dots (3-27)$$

となるが、 $C/(\rho g l)$ については、両系を満足させることはできない。したがって、

$$\alpha \cdot \frac{C}{\rho g l} = \frac{C_m}{\rho_m g_m l_m} \quad \dots\dots\dots (3-28)$$

ここで、 α はひずみ係数である。

同一の土ということから、 $C = C_m$ 、 $\rho = \rho_m$ とし、 $g = g_m$ であるから、上式は次のように整理できる。

$$\alpha = \frac{l}{l_m} = n \quad \dots\dots\dots (3-29)$$

以上のことから、土が全く同一であり、土の因子が定数で表わされる場合には、 δ と n との関係を調べることになり、土の因子は消去される。

一方、予報係数 δ の算出方法として、図 3-13(b) に示した土・排土板別の各直線の実験式について、 Π_2 の 3 水準、つまり、

$\pi_2 = 1 \times 10^{-3}, 3 \times 10^{-3}, 5 \times 10^{-3}$ に対する π_1 の値を求めた。そして、6枚の排土板中から任意の2枚を選んでも、すべての組合せについて、大きな排土板を実物、小さな方をモデルとして(3-18)式により δ を算出した。

δ と n との関係を、

図3-18に示す。図は土Fの例であるが、 $\delta-n$ 曲線は他の土においても同様の傾向を示した。3水準の π_2 に対応して得られる各 δ の値(図中、たとえば、 δ_1 とは $\pi_2 = 1 \times 10^{-3}$ における π_1 および π_{1m} より(3-18)式を用いて算出したものである)は、

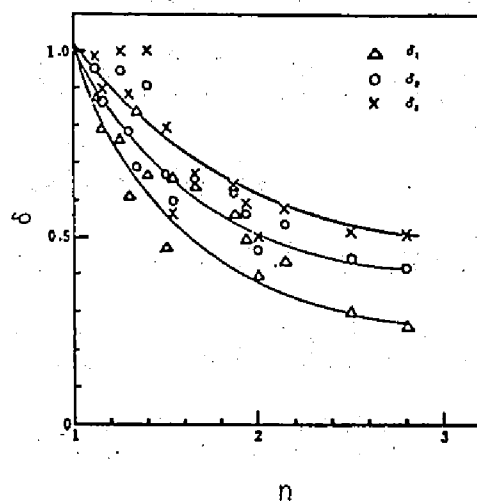


図3-18, δ と n の関係
(土Fの場合)

n が大きくなるとともに減衰し、この関係を両対数グラフにプロットすると、ほぼ直線で表わされることから、 $\delta-n$ の関係を指数関数形とすることができそうである。

表3-11, 回帰方程式 (δ vs. n)

E	$\delta_1 = 1.023 n^{-1.383}$ $\delta_3 = 0.943 n^{-1.210*}$
F	$\delta_1 = 0.994 n^{-1.203}$ $\delta_3 = 1.022 n^{-0.911}$ $\delta_5 = 1.028 n^{-0.787}$
G	$\delta_1 = 1.022 n^{-0.861}$ $\delta_3 = 0.999 n^{-1.200}$ $\delta_5 = 0.994 n^{-1.370}$
D ~ G	$\delta_1 = 0.971 n^{-1.024}$ $\delta_3 = 1.012 n^{-1.042}$ $\delta_5 = 1.030 n^{-1.058}$

* 危険率5%で回帰性と認めた。

ここで、 δ と n について、前述の方法で回帰性の検定を行ない、回帰性の認められたものについては、回帰方程式を求めた(表3-11)。土D、Eでは回帰性のない場合が出現したが、その原因は土の準備の不均平、不均質などが排土板抵抗に大きく影響したことにありと考えられる。対照的に土E、Gでは δ と n の間の回帰性が高いことが明らかになった。また、 (δ, π_2, n) 平面について回帰性を検討したが、危険率1%で回帰性の認められたのは、土Gのみであった(表3-12)。

次に、排土板抵抗が縮尺比 n とどのような関係式で示されるかを知ることは、ひずみの取扱いからは離脱するが、興味ある点である。それは、既に求めた δ と n との関係から誘導できる。いま、 δ と n の関係を次式で表わすものとする。

$$\delta = A n^{-B} \quad \dots\dots\dots (3-30)$$

同一の土において実物とモデルの両方を実験する場合には、 δ は次のように書きかえられる。

$$\delta = \frac{\pi_1}{\pi_{1m}} = \frac{1}{n^3} \cdot \frac{D}{D_m} \quad \dots\dots\dots (3-31)$$

(3-31)式を(3-30)式に代入し整理すると、

$$\frac{D}{D_m} = A \cdot n^{3-B} \quad \dots\dots\dots (3-32)$$

となる。いま、 δ と n との間に回帰性の得られた場合について、(3-32)式にしたがって計算した結果は、表3-13の通りである。表3-13から、排土板抵抗は縮尺比の1.62~2.21

乗に比例することがわかる。しかし、土の種類および π_2 の水準による一定した傾向はデータの少ないこともあり、明言できるものはない。しかしながら、標準砂の場合が3乗であったこと（実験〔1a〕の結果を参照のこと）および本実験の結果を通じて言えることは、Schäfer等が言及しているように⁵³⁾、「 δ を n の指数関数として示す場合、その指数が土の性質や土に対する機械作用のタイプなどによって変わる。」ということを検討しつつ、今後更に追求すべきである、ということである。

表 3-12. 分散分析表

[(δ , π_2 , n) 平面の回帰性]

SV	SS	DF	MS	F_0	F(0.01)
π_2 の δ への回帰変動	0.1147	1	0.1147	14.896 ^{**}	7.27
n の δ への回帰変動	0.7580	1	0.7580	98.442 ^{**}	7.27
全回帰変動	0.8727	2	0.4364	56.675 ^{**}	5.15
残差変動	0.3233	42	0.0077		
計	1.1960	44			

表 3-13. $D/D_m = A n^{3-B}$ における指数値

土	$\pi_2 = 1 \times 10^{-3}$	$\pi_2 = 3 \times 10^{-3}$	$\pi_2 = 5 \times 10^{-3}$
D	-	-	-
E	1.617	1.790*	-
F	1.797	2.089	2.213
G	2.139	1.800	1.630
D ~ G	1.976	1.958	1.942

- 回帰性が認められなかったもの。
- * 危険率 5% で有意差が認められたもの。
その他は危険率 1% で有意差が認められたもの。

iii) δ と $\alpha_R, \alpha_Q, \alpha_S$ との関係

相似条件の誘導とひずみの取扱いの項で記した手順に従って、予報係数とひずみ係数の関係を検討する。

この場合も δ として、 $\Pi_2 = v^2/(g \cdot h) = 1 \times 10^{-3}, 3 \times 10^{-3}, 5 \times 10^{-3}$ に対応して $\delta_1, \delta_3, \delta_5$ の3段階を設定し、ひずみ係数との関係を調べた。土と排土板の各組合せのすべてについて、 $\alpha_R, \alpha_Q, \alpha_S$ を求めた。 δ と α_R, α_S との関係を図3-19に例示し、 δ と α_Q との関係については図3-20, (a), (b), (c) にその結果を示す。すべての場合について、予報係数とひずみ係数との関係は両対数グラフにおいて、ほぼ直線で示されることが判った。そこで、回帰性の有無を検定し、危険率1%, 5%で回帰性の認められたものについては回帰方程式を求めた。その結果を表3-14, (a), (b) に示す。

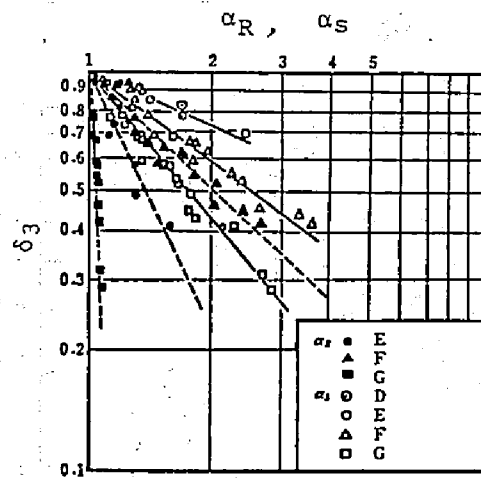


図3-19, δ_3 と α_R, α_S の関係

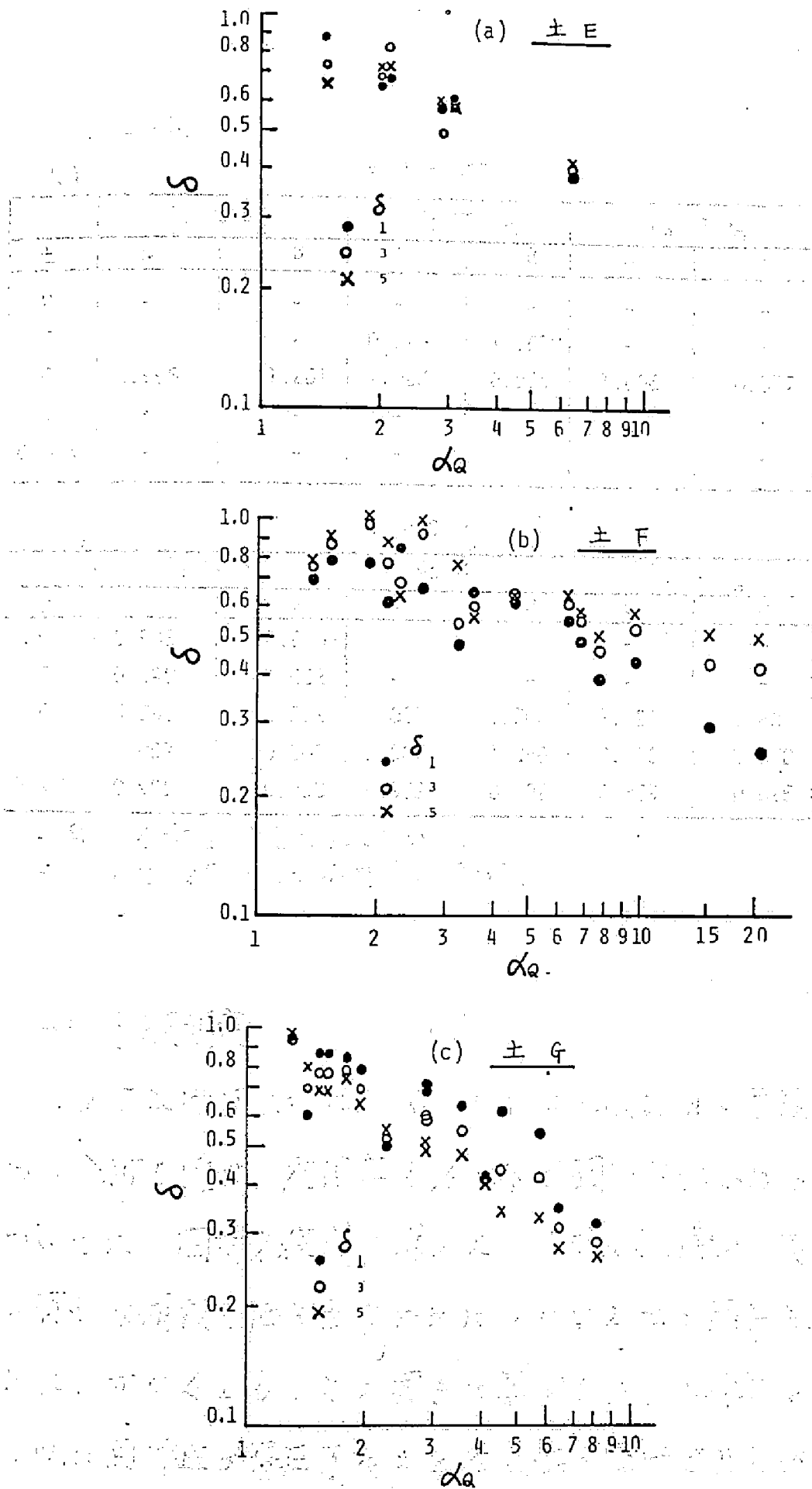


図 3-20 δ と α_Q の関係

表 3-14

(a) $\delta = A \alpha_R^{-B}$

土	δ_1 VS α_R		δ_3 VS α_R		δ_5 VS α_R	
	A	B	A	B	A	B
D	-	-	-	-	-	-
E	-	-	0.914*	1.667*	-	-
F	0.996	1.261	1.023	0.954	1.006	0.877
G	-	-	-	-	-	-
D~G	-	-	-	-	-	-

(b) $\delta = C \alpha_S^{-D}$

土	δ_1 VS α_S		δ_3 VS α_S		δ_5 VS α_S	
	C	D	C	D	C	D
D	0.945*	0.970*	-	-	-	-
E	0.899	1.002	-	-	-	-
F	0.993	0.982	1.021	0.744	1.024	0.637
G	1.097	0.907	0.907	1.046	0.843	1.078
D~G	0.999	0.998	0.909	0.732	0.869	0.625

- 印は有意差が認められなかった。

* 印は危険率 5% で有意差が認められた。

4) 予報精度

ひずみ係数 α_R , α_a , α_s および縮尺比 n と予報係数 δ との回帰分析を通じ, 危険率 5% 以下で回帰性の認められる場合については, 回帰方程式を求めた。モデル試験から実物についての有効な情報を抽出するためにいかなる土の因子を採用すべきかは, 少なくとも, その因子に基づくひずみ係数と予報係数との間に回帰性が存在することは最低の条件であるが, それに加えて, 高い予報精度を持つことが要求される。

そこで、まず、各ひずみ係数の予報係数に対する回帰性の総合結果をまとめて表3-15に示す。表より明らかなように、 α_Q が土の種類、けん引速度の段階に関係なく、すべての場合に δ と回帰性を持っているのに対し、 α_R は回帰性が認められる場合が最も少ない。土別に見ると、土Fではすべての場合に高度の回帰性を示したが、粘着性が高く最もコントロールしにくい状態の土Eでは、 α_Q を除けば、いずれも回帰性が認められない場合が多い。

次に、予報精度として、回帰分析において得られる標準誤差を以って表わすことも一つの方法と考えられるが、ここでは次式によって予報精度を定義する。

$$\varepsilon = \left| \frac{\pi_{1t} - \pi_{1p}}{\pi_{1t}} \right| \times 100 \quad (\%) \dots\dots\dots (3-33)$$

ここで、 ε ; 予報精度

π_{1t} ; 実物とみなす排土板のけん引抵抗の測定値

π_{1p} ; 回帰方程式および(3-18)式を用いて、各モデルから実物について算出される π_1 の計算値

いま、各土で実験に用いた排土板のうち、最も大きなものを実物とする。すなわち、土Eでは排土板IV、土FおよびG

表 3-15, 分散分析結果

土	δ	α_R	α_Q	α_S	η
E	δ_1	-	**	**	**
	δ_3	*	*	-	*
	δ_5	-	*	-	-
F	δ_1	**	**	**	**
	δ_3	**	**	**	**
	δ_5	**	**	**	**
G	δ_1	-	**	**	**
	δ_3	-	**	**	**
	δ_5	-	**	**	**

- 回帰性が認められなかったもの。
- * 危険率5%で回帰性が認められたもの。
- ** 危険率1%で回帰性が認められたもの。

では排土板 VI (14 x 28, cm) を実物とし, その他をモデルとする。(3-33)式により, 各モデルから実物に対する予報精度 ρ を求め, 表 3-16 に示す。次に, この分野の研究において, 当面目標とする予報精度の値には種々の考え方ができようが, ここでは, 米国の ASAE の *Similitude of Soil-Machine System* の部会が提示している⁵²⁾ 予報精度 10%を一応の基準として本実験の結果を検討した。図 3-21 は横軸に各モデルの n を記して予報精度をグラフ化したものであるが, 予報精度 10%ラインを引いて見ると, 次に列挙する事項が指摘できる。

- a) 土 E では, 予報係数とひずみ係数との回帰性が得られた場合が少なかったのであるが, 回帰性の認められた場合でも予報精度は 10%以上を示す例が多い。

表 3-16. モデルから実物に対する排土板抵抗の予報精度 (%)

		$\pi_2 = 1 \times 10^{-3}$					$\pi_2 = 3 \times 10^{-3}$					$\pi_3 = 5 \times 10^{-3}$				
土	ひずみ 係数	排土板 I	II	III	IV	V	排土板 I	II	III	IV	V	排土板 I	II	III	IV	V
E	α_R	39.9	44.4	53.2	<div></div>	<div></div>	-	-	-	<div></div>	<div></div>	-	-	-	<div></div>	<div></div>
	α_Q	19.9	21.5	19.6			33.0	21.5	17.1			41.1	17.8	10.8		
	α_S	7.9	11.8	0.3			-	-	-			-	-	-		
	n	36.9	53.0	36.9			32.0	47.3	45.7			-	-	-		
F	α_R	9.7	8.7	15.7	0.1	0.4	5.3	5.7	7.3	17.2	3.6	17.2	8.4	7.8	25.0	7.1
	α_Q	12.7	7.1	15.3	0.5	1.5	4.9	5.5	7.5	17.1	3.5	10.4	2.2	2.8	21.9	4.4
	α_S	8.9	2.2	7.6	9.3	3.8	6.0	0.7	0.7	11.6	0.6	11.0	2.3	3.4	17.5	2.0
	n	10.2	24.0	15.5	0.1	0.4	5.0	17.9	7.2	17.2	3.6	10.6	13.6	2.5	22.0	4.4
G	α_R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	α_Q	12.6	22.1	14.7	3.2	3.2	5.7	9.1	11.4	3.4	5.7	3.7	3.7	25.6	31.7	9.8
	α_S	18.8	10.0	11.1	3.7	11.3	4.0	22.3	4.8	2.0	9.6	3.2	40.6	1.0	3.4	18.6
	n	19.3	37.0	22.2	10.7	0.9	0.9	20.0	14.1	4.5	4.9	6.9	14.2	10.8	1.4	10.7

註) 土Eでは排土板IV, 土F, Gでは排土板VIを実物とした。

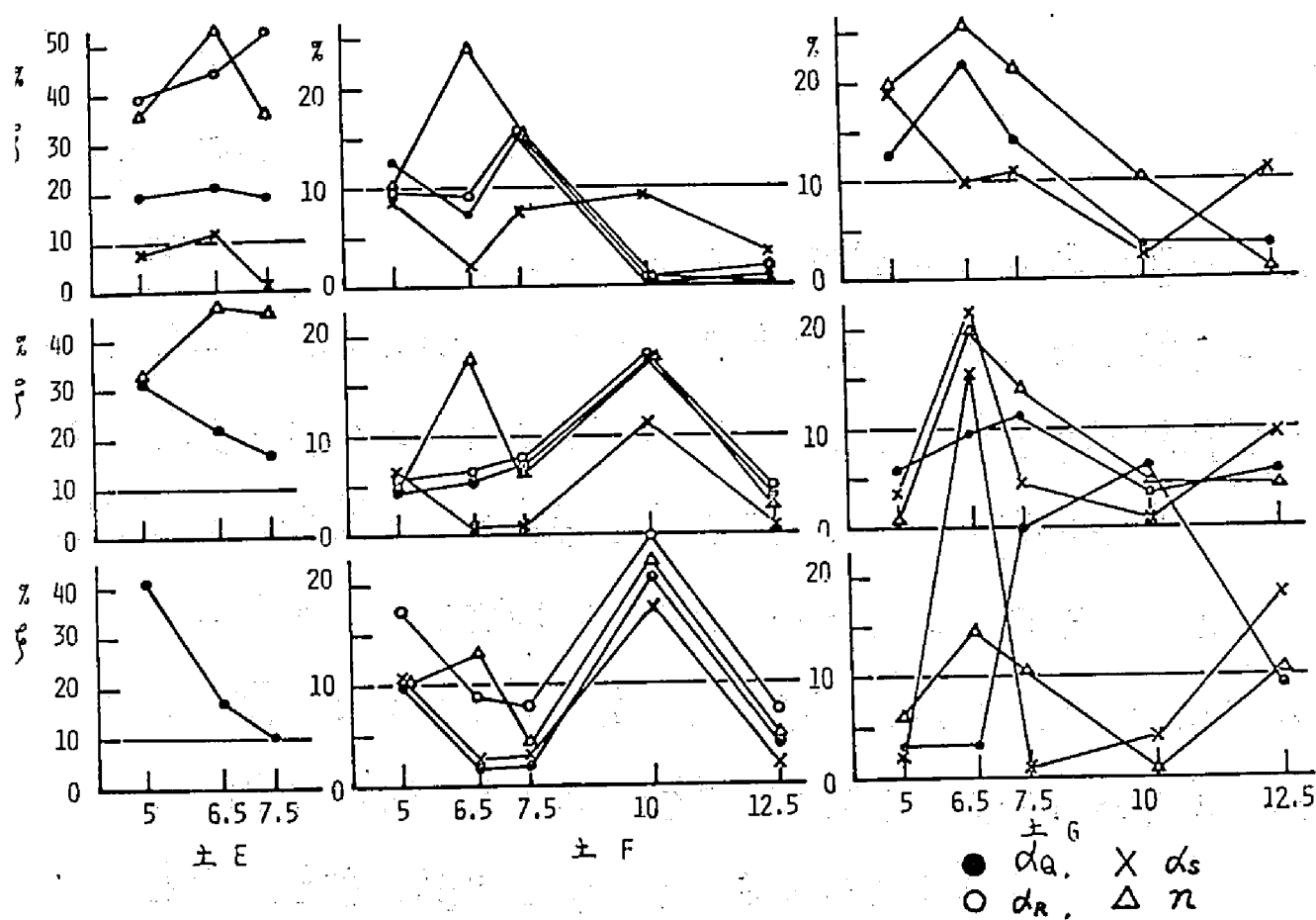


図 3-21, 予報精度 (上段より $\delta_1, \delta_3, \delta_5$ の場合)

- b) 予報精度10%以内を示す割合から各ひずみ係数の順位を見ると、 α_s , α_q , α_R , n となる。
- c) けん引速度の段階による予報精度への影響は顕著ではない。

5 要約

図3-12 および表3-8 に示す砂質ロームの各状態について、排土板抵抗に関するモデル実験を行なった。土の因子として、密度のほか、円板貫入抵抗 R , Q および基準板抵抗 S を選定した。結果および考察を要約すれば、次の通りである。

- 1) 土 A, B, C では相似性が成立したが、土 D, E, F, G においては、明らかにひずみを生じた。貫入抵抗曲線から判断すると(図3-14)、ひずみの発生およびその度合いは、土の粘着力と密接な関係を持っていると考えられる。
- 2) 関係因子から重力加速度を除去する方法は、ひずみの取扱上有効であった。
- 3) Π_2 の3水準別に、 δ に対する $\alpha_R, \alpha_q, \alpha_s, n$ の回帰性と予報精度を調べると、どの土に対しても回帰性を持つという点では α_q が最も有望であるが、予報精度の点では α_s にやや劣る。土の因子を含めず、縮尺比 n のみで予報する場合は、回帰性は多くの土、けん引速度の組合せ条件下において認められたが、肝心の予報精度は最も低いことがわか

った。 α_R は回帰性, 予報精度を総合すると, α_s, α_q と n との中間に位置づけられよう。

§4. 実験〔2〕——乾燥砂-トラック・シュー系——

1. 目的

実験〔1a, 1b〕において対象とした系に、垂直荷重が加わえられた系の一例としてトラック・シューを採り上げた。トラック・シューに関する理論及び実験研究はこれまでに数多くの研究者によってなされてきているが、^{10) 等}未だ解明されていない状態にあり、いくつか提示されているシューの発揮しうる推力に関する式の信頼性は高いとは言えない。特に、シュー間隙の推力や沈下に及ぼす効果については種々の結果が報告されているが、^{68), 69)}効果の有無及び効果の度合いはシューの対象とする地盤の土性によるところが大きいようである。

以上の観より、本実験においては二つの具体的目的を設定した。

i) 形状は互いに相似であるが、大きさの異なる3種類のモデル・シューを乾燥砂中においてけん引する際の、動力学的相似性および沈下曲線に関する幾何学的相似性の成立の有無を実験を通じて明らかにする。前者の動力学的相似性においては、シューへの砂の抵抗の水平分力（以後、単に抵抗と記す）を、後者ではシューの沈下量を特性値とし、系の従属変数として採り上げた。

ii) シューの形状（長さ、巾、高さ）が抵抗に及ぼす影響を、シュー間隙および接地圧をパラメータとして検討する。

2 相似条件の誘導

モデル・シューは、図3-22に示されるように、3枚のシューがー組になるように結合され、乾燥砂中をけん引される。その際、シューのけん引抵抗および沈下量に関係する因子として、表3-17の諸変数が選定された。

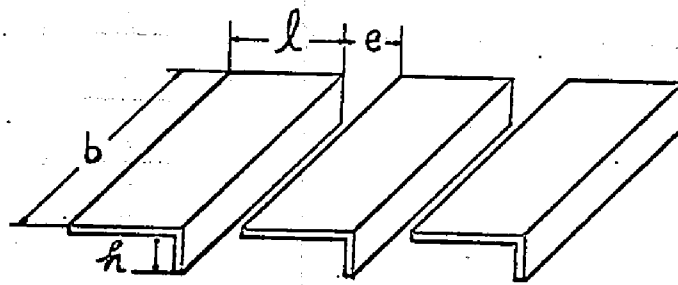


図 3-22, 供試トラック・シュー

表3-17, 乾燥砂—トラック・シュー系の関係因子

因 子 名	記 号	次 元
シュー, けん引抵抗	D	$M L T^{-2}$
沈 下 量	Z	L
縦の長さ	l	L
巾	b	L
高 さ	h	L
けん引速度	v	$L T^{-1}$
間 隙	e	L
水平移動距離	s	L
接 地 圧	p	$M L^{-1} T^{-2}$
砂 密 度	ρ	$M L^{-3}$
内部摩擦角	ϕ	-
その他 重力加速度	g	$L T^{-2}$

系の関係因子を次元解析し，得られた無次元量について，それぞれ Π に添字を付して示せば，次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \Pi_D &= \frac{D}{\rho g \ell^3} \\ \Pi_Z &= \frac{Z}{s} \\ \Pi_v &= \frac{v^2}{g \ell} \\ \Pi_p &= \frac{p}{\rho g \ell} \\ \Pi_e &= \frac{e}{\ell} \\ \Pi_s &= \frac{s}{\ell} \\ \Pi_h &= \frac{h}{\ell} \\ \Pi_b &= \frac{b}{\ell} \\ \Pi_\phi &= \phi \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3-34)$$

したがって，3種類のモデル・シユーの中から種類を取り出し，寸法の大きなシユーを実物，小さな方をモデルと考えれば，両者間に与えるべき相似条件は，次式により表わされる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{v^2}{g \ell} &= \frac{v_m^2}{g_m \ell_m} \rightarrow v_m = \frac{v}{\sqrt{n}} \\ \frac{p}{\rho g \ell} &= \frac{p_m}{\rho_m g_m \ell_m} \rightarrow p_m = \frac{p}{n} \\ \frac{e}{\ell} &= \frac{e_m}{\ell_m} \rightarrow e_m = \frac{e}{n} \\ \frac{s}{\ell} &= \frac{s_m}{\ell_m} \rightarrow s_m = \frac{s}{n} \\ \frac{h}{\ell} &= \frac{h_m}{\ell_m} \rightarrow h_m = \frac{h}{n} \\ \frac{b}{\ell} &= \frac{b_m}{\ell_m} \rightarrow b_m = \frac{b}{n} \\ \phi &= \phi_m \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3-35)$$

以上の相似条件を両系に与えれば，

$\Pi_D = \Pi_{Dm} \dots\dots\dots (3-36)$

および

$\Pi_Z = \Pi_{Zm} \dots\dots\dots (3-37)$

の二つの予報式が成立する。ただし、添字 m はモデルを、 π は縮尺比を示す。

3 実験方法

1) 供試モデル・シュー

相似性実験に供試するモデル・シューは、まず最も大きな寸法を持つシューの諸元から決定した。それには、現実のトラック・シューの諸元を参考にするとともに、実験装置の規模からくる制約、特に、適切な接地圧を与えるための載荷重錘を考慮して、シューの b, l を定めた。表 3-18 に相似性実験用のモデル・シューの諸元を示す。S-1 の b, l は実際のトラック・シューの約 $\frac{1}{2}$ の寸法であるが、 h はほとんど同じである。 h を b, l と同じ縮尺にすると、S-1 の h が 1.5 cm となり、したがって、S-2, S-3 の h はごく小さな値になってしまう。現実のトラック・シューとは、やや

離脱することになるが、 h を大きく設定してその効果を含めて検討することにした。S-1 の寸法をもとに、(3-35)式より S-2, S-3 の諸元を定めた。

表 3-18, 相似モデル・シュー諸元
単位 (cm)

記号	l	b	h
S - 1	6	18	3
S - 2	4	12	2
S - 3	3	9	1.5

次に、シユ-の形状のけん引抵抗に及ぼす影響を、接地圧、シユ-間隙をパラメータにして検討するために、表3-19に示す2種類のモデルシユ-を使用した。すなわち、 l 、 b は一定に h を変えたシユ-（H系シユ-と呼ぶ）と、 l 、 h を一定に b を変えたシユ-（B系シユ-と呼ぶ）である。

モデルシユ-はいずれも厚さ5mmの山形鋼を切削加工して製作したものであり、図3-22のように、常に3枚一組の状態で実験に供した。

表3-19, H, B系シユ-諸元
単位 (cm)

記号	l	b	h
H系 H-1	6	18	3
H-2	6	18	2
H-3	6	18	1
B系 B-1	6	18	3
B-2	6	12	3
B-3	6	9	3

2) 実験装置

実験装置の概略を、図3-23に示す。

固定支柱①に矢印方向の回転のみが自由であるピン結合した上下各2対の平行リンク②と前後2対の平行リンク③とは、左右1対の十字形の棒④を介してピン結合され、矢印方向に回転が自由である。4本のリンク③の下部は重錘⑤のための載荷板⑥にピン結合され、矢印方向の回転が自由である。そして、

載荷板下面にモデル・シュー取付板⑦と溶接した。このシュー取付板には長手方向にスリットが設けられており、シュー間隙を任意に与えて固定することができる。バランス・ウェイト⑧は、その取付位置または重量を調節することにより、シューを装置に取り付けた状態でリンクなどの構成部材によるシューへの垂直荷重を完全に除去し、実験で設定する垂直荷重、つまり、重錘⑤の重量のみをテスト・シューにかけるという役割を果たす。けん引台車⑨は上述の装置をその台枠内に収納した状態で、けん引ロープ⑩によりレール⑪上を引かれる。このけん引台車にはシューの沈下に関係なく、シューへの抵抗の水平前後方向の分力を受けるころばり軸受利用の接触点⑫が張力計(ストレインゲージ利用)⑬と同じ高さに設けられている。

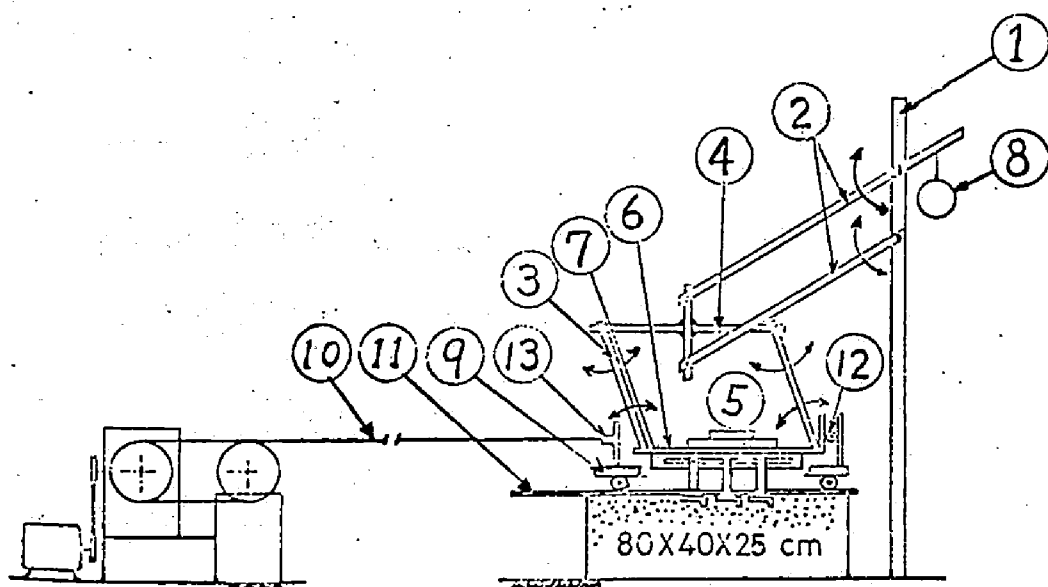


図 3-23. 実験装置

本実験装置により，モデル・シューはけん引に際して常に水平の状態を保ちつつ，上下方向の浮き沈みのみが許されるという条件の下に移動することになり，現実のトラック・シューの状態とは相違するが，現象を簡明にし，実験条件をコントロールできる利点を持っている。

実験装置に設置された測点は，i) けん引抵抗測定用張力計，ii) シュー沈下量測定用差動トランス および iii) シュー前進移動距離測定用の電気接点（1 cm 間隔ごとに接点を設置）である。

3) 供試砂およびその準備操作

実験に供試した砂は実験〔1a〕に用いた標準砂であり，本実験期間を通じて含水比は 0.14 ~ 0.18 % とよく乾燥した状態であった。

図 3-23 に記したように土壤槽は比較的小さなものであったから，一つの実験が終了するたびごとに槽中の砂を排出し，改めて充填し，柄付き木板でできる限り均一に突き固めて均平にするという準備操作を行なった。そうした準備操作の結果得られた砂の充填密度は，平均値にして 1.51 g/cm^3 であった。

4) 実験計画

i) 相似性実験

D および E の関係因子中， l ， b ， h については，まず S-1 シューについてその寸法を定め，S-2 および S-3 に

については、縮尺比 n に基づき各シューが幾何学的相似条件を満足するように定め、表 3-18 に既に示した。標準砂の中は含水比の変化が微小であるから、一定とみなしてよい。よって、残る独立因子 v , μ , e , λ について実験条件を定めればよい。

現実のトラップ・シューのスリップ速度および接地圧の値を考慮して、まず S-1 について、 v と μ を各 3 水準設定した。S-1 の v , μ がきまると、(3-35) 式により、S-2, S-3 のけん引速度と接地圧が容易に求められる。

次に、 e の水準の決定に当っては、特別の根拠はなく、従来の研究⁶⁹⁾を参考にして 3 水準とした。また、 λ は次章の結果および考察において説明するように、シューの製作上の設計条件でもなければ、実験に際してシューに与えるべき操作条件でもないため、ここでは言及しない。

上記のように、本実験では v , μ , e を各 3 水準に変え、繰り返しのない三元配置法の実験計画のもとに行なわれた訳であるが、各モデル・シューに与えた v , μ , e の値および π 値を表 3-20 (a), (b) に示す。

ii) H 系, B 系シューの実験

H, B 両系のシューに対しては、 v , e , μ を表 3-21 に示すように、各 3 水準ずつ、等しい条件下で実験を行なった。けん引抵抗は、シューの水平移動距離 5 cm における値を、記録より算出した。

表 3-20 (a) v, p, e の設定値

けん引速度 (cm/sec)	S-1	S-2	S-3
v-1	2.00	1.63	1.41
v-2	5.00	4.08	3.54
v-3	8.00	6.53	5.66
シュー間隙 (cm)			
e-1	0.0	0.0	0.0
e-2	3.0	2.0	1.5
e-3	6.0	4.0	3.0
接 地 圧 (kg/cm ²)			
p-1	0.300	0.200	0.150
p-2	0.240	0.159	0.120
p-3	0.160	0.107	0.080

(b) Π_v, Π_p, Π_e の設定値

Π_{v-1}	7×10^{-4}	Π_{p-1}	17.6	Π_{e-1}	0.0
Π_{v-2}	43×10^{-4}	Π_{p-2}	26.4	Π_{e-2}	0.5
Π_{v-3}	109×10^{-4}	Π_{p-3}	33.0	Π_{e-3}	1.0

表 3-21 v, p, e の設定値

v (cm/sec)		p (kg/cm ²)		e (cm)	
v-1	2.0	p-1	0.16	e-1	0
v-2	5.0	p-2	0.24	e-2	3
v-3	8.0	p-3	0.30	e-3	6

4. 結果および考察

(1) 相似性実験

1) 抵抗, 沈下の概要と Π の決定

v , μ , e を3水準に設定し, 各モデル・シュートについて27回, 合計81回の実験の結果, 抵抗と沈下の両記録線図にはシュートの種類や実験条件の組合わせによる顕著な特徴は見られず, いずれもよく似た推移を示した。図3-24に記録の模式図を示し, その概要を説明する。

けん引を始めると, まずロープが緊張し, 抵抗曲線は緩かに出現する。ついで, シュートへけん引力が伝達されると急激な

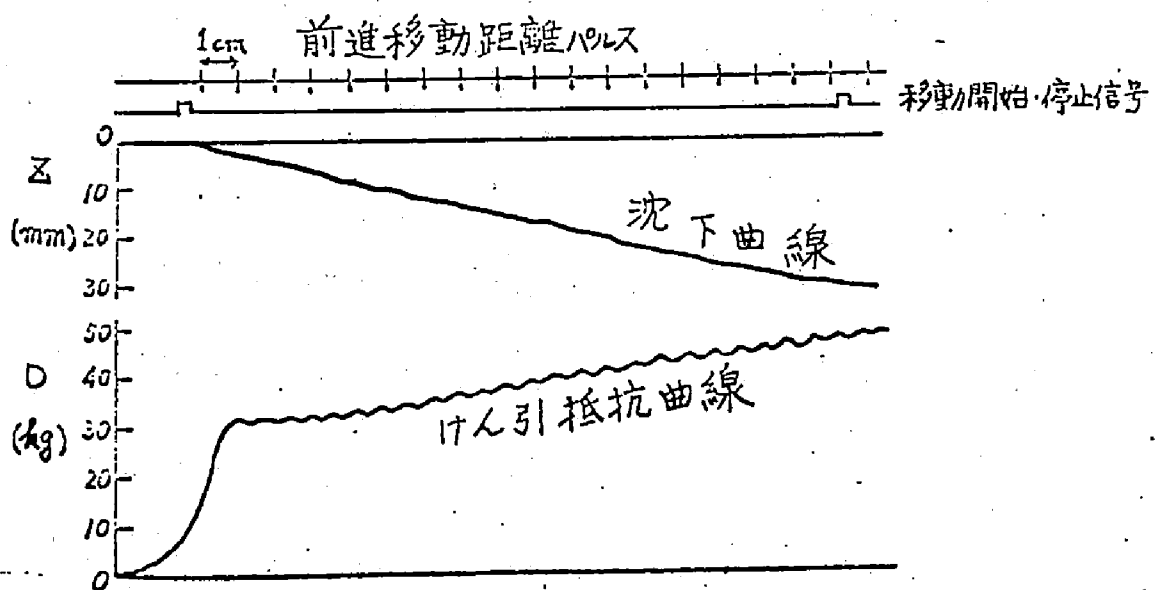


図 3-24, 記録模式図

立ち上りを示す。この間に、シユーの移動・沈下が始まる。抵抗、沈下の両曲線は、直線または指数曲線状に漸増しつづけ、急激な変動やピークの出現は見られなかった。

次に、抵抗および沈下量の読み取り点の決定、すなわち、 α の設定については、次の考え方によった。

D 、 Σ 両曲線はシユーの移動に伴ない漸増してゆくのはどのシユーにも見られた傾向であるが、各シユーの水平移動距離のある1点を採り上げて、その点に関してのみの結果から全体の結論とすることには危険がある。つまり、シユーがけん引きれ始めて間もない地質においては、砂の、とくにその表層の状態が D 、 Σ に敏感に影響を与え、ひいては相似性の成立、不成立に関係することが考えられる。また逆に言えば、 α の値を大きくとってゆくと、次第にシユーの初期条件が打消されてくることが予想される。いずれにせよ、シユー下の砂の応力状態ならびに変位、流動に、 D 、 Σ の出現状態は根本的に左右されるわけである。

上述の理由により、4段階の Π_0 を設定し、各モデルに対応して(3-35)式より α を求め、表3-22の通りに D 、 Σ の読み取り点を決定した。

図に、 $\Pi_0 = 2.0$ までのシユー移動距離内では、沈下しつづけん引きされるモデルシユーの上面での砂の堆積が載荷板を上方に押し上げるという現象は生じなかった。

表 3-22. Π_s の設定値 (cm)

Π_s	S-1	S-2	S-3
0.5	3	2	1.5
1.0	6	4	3.0
1.5	9	6	4.5
2.0	12	8	6.0

2) 抵抗に及ぼす各因子の影響

相似性成立の有無を検討することに先立ち、各モデルシュージョに、抵抗に及ぼす各因子の影響度を調べた。例を S-1 にとり、 $\Pi_s = 1.0$ の場合について見る。v, ρ , e を各水準に渡って行なった計 27 回の実験で得られた D について分散分析をした結果は、表 3-23 の通りである。抵抗に最も影響を与えるものは接地圧であり、1% の危険率で有意。寄与率にして 91.9% である。これに反し、シュージ間隙およびけん引速度は 5% の危険率においても有意と認められなかった。

同様の手法で他のすべての場合について行なった分散分析結果を要約し、1% または 5% の危険率で有意となった因子ならびに交互作用を持つ因子の組合わせを、表 3-24 に掲げる。シュージの種類および Π_s の段階に拘わらず、 ρ , e および $\rho \times e$ の交互作用は認められるが、v のみの影響はなく、僅かに S-1, $\Pi_s = 0.5$ および S-2, $\Pi_s = 1.0$ で、 $e \times v$ の効果が認められたにすぎない。

表 3-23. 分散分析表
(S-1 シュー, $\Pi_5 = 1.0$)

SV	SS	DF	MS	F ₀	CF#
v	8.26	2	4.13	1.24	0.6
e	18.90	2	9.45	2.84	1.3
p	1320.06	2	660.03	198.36**	91.9
v x e	28.88	4	7.22	2.17	2.0
e x p	6.30	4	1.58	0.47	0.4
v x p	27.60	4	6.90	2.07	1.9
誤差	26.62	8	3.33		1.9
計	1436.62	26			100.0

CF; 寄与率 (Contribution Factor)

表 3-24. 分散分析結果 および寄与率

S / l	0.5		1.0			1.5		2.0		
S - 1	p**	exv*	p**			p**		p**	e**	pxe*
	91.3	3.6	91.9			92.8		87.7	8.1	2.1
S - 2	p**		p**	exv**	e**	p**	e**	p**	e**	
	85.1		87.5	4.6	4.2	88.9	4.8	82.5	13.4	
S - 3	p**	e*	p**			p**		p**		
	81.1	5.5	79.4			92.0		84.9		

* 危険率 5% で有意, ** 危険率 1% で有意と認められた。
上欄は有意と認められた因子, 下欄は寄与率を示す。

3) 動力学的相似性

前項で明らかになったように, 本実験でシューに与えた v の範囲内では, v の D に及ぼす影響はないと考えてよい。

ら、この実験は μ , e を各3水準にし、3回繰り返しのある実験として取扱うことにする。したがって、 Π_p , Π_e の組合わせの各状態について、 Π_D が各モデル・シユーについて同一値とみなせるか否かを、 Π_D の各段階ごとに、分散分析法により検討すればよい。ここで断わっておくが、 Π_p , Π_e の組合わせの各状態はそれぞれが固有の砂-モデル・シユー系である。たとえば、 Π_{p-1} , Π_{e-1} と Π_{p-2} , Π_{e-1} とは全く異なる系を意味している。 μ , e は D の関係因子には違いないが、同じ Π_p , Π_e の条件下で各モデル間に相似性が成立しているか否かを調べる必要がある。

いま、その一例を表3-25によって検討する。表は、 $\Pi_e = 0$ Π_{p-1} の条件下、すなわち、各モデル・シユーともシユーの間隙はなく、接地圧 0.3 kg/cm^2 という状態でけん引した場合に得られた抵抗曲線の $\Pi_A = 1.0$ における抵抗値 D に基づき、各モデル・シユーについて求めた Π_D 値間には95%の信頼係数を以って差が認められないということを示している。したがって、予報式(3-36)の通り、 Π_D について各モデル・シユー間に有意差が認められないことから、動力学的相似性が成立していると言える。 $\Pi_D = D/(\rho g l^3) = \text{constant}$ であることから、 D は l^3 に比例することになり、このことは実験[1a]で得られた結果とも一致している。

Π_e , Π_p のすべての組合わせの場合について、分散分析結果を表3-26に示す。表中、危険率1%または5%で各モデル・シユー間の Π_D 値に差が認められる場合は、全体の約2割に達している。

表 3-25, 分散分析表

($\Pi_e = 0$, $\Pi_s = 1.0$, $\Pi_p = 17.6$)

SV	SS	DF	MS	F_0	F(0.05)	F(0.01)
シユ-の種類	229.8	2	114.9	1.75	5.14	10.92
誤差	393.9	6	65.7			
計	623.7	8				

表 3-26, 分散分析結果

Π_s		0.5	1.0	1.5	2.0
$\Pi_e = 0$	$\Pi_p - 1$	-	-	-	-
	$\Pi_p - 2$	-	-	*	-
	$\Pi_p - 3$	-	-	-	**
$\Pi_e = 0.5$	$\Pi_p - 1$	*	-	-	-
	$\Pi_p - 2$	-	-	*	-
	$\Pi_p - 3$	-	-	-	-
$\Pi_e = 1.0$	$\Pi_p - 1$	-	-	**	**
	$\Pi_p - 2$	-	*	*	-
	$\Pi_p - 3$	-	-	-	-

* 危険率 5% で有意と認められた。

** 危険率 1% で有意と認められた。

- 有意差なしと認められた。

そうした動力学的相似性不成立の場合の出現状態を見ると, Π_e , Π_p による一定の傾向はないが, $\Pi_s = 1.5, 2.0$ で多く見られる。このことから, 次の推量が可能である。各モデル・シユ-のけん引

開始前の状態やけん引に伴う砂粒子の変位、流動状態の僅かな差異が、シューの移動につれて拡大される結果、その抵抗に次第に大きな影響を及ぼし、ひいては非相似現象をもたらす場合が多発する。

4) Π_0 と Π_e, Π_p の関係

Π_e, Π_p を各モデル・シューに等しく与えれば、その結果得られる各 Π_0 値には有意差が認められない場合が大半を占めるということを前提とし、その Π_0 が Π_e, Π_p の各水準によってどのように変動するかを検討する。 Π_e, Π_p の組合わせ条件ごとに、各モデル・シューについて3個、計9個の Π_0 が得られるから、9回繰り返しの二元配置法による分散分析を行なった。

いま、 $\Pi_0 = 0.5$ および 2.0 の場合の結果を表3-27, (a), (b) に例示する。他の Π_0 での結果も、この例と同様の内容が得られた。すなわち、 Π_p はすべて危険率1%で、 Π_e は危険率1%または5%で、いずれも Π_0 に対する明らかな効果があるが、 $\Pi_p \times \Pi_e$ の交互作用は認められない。

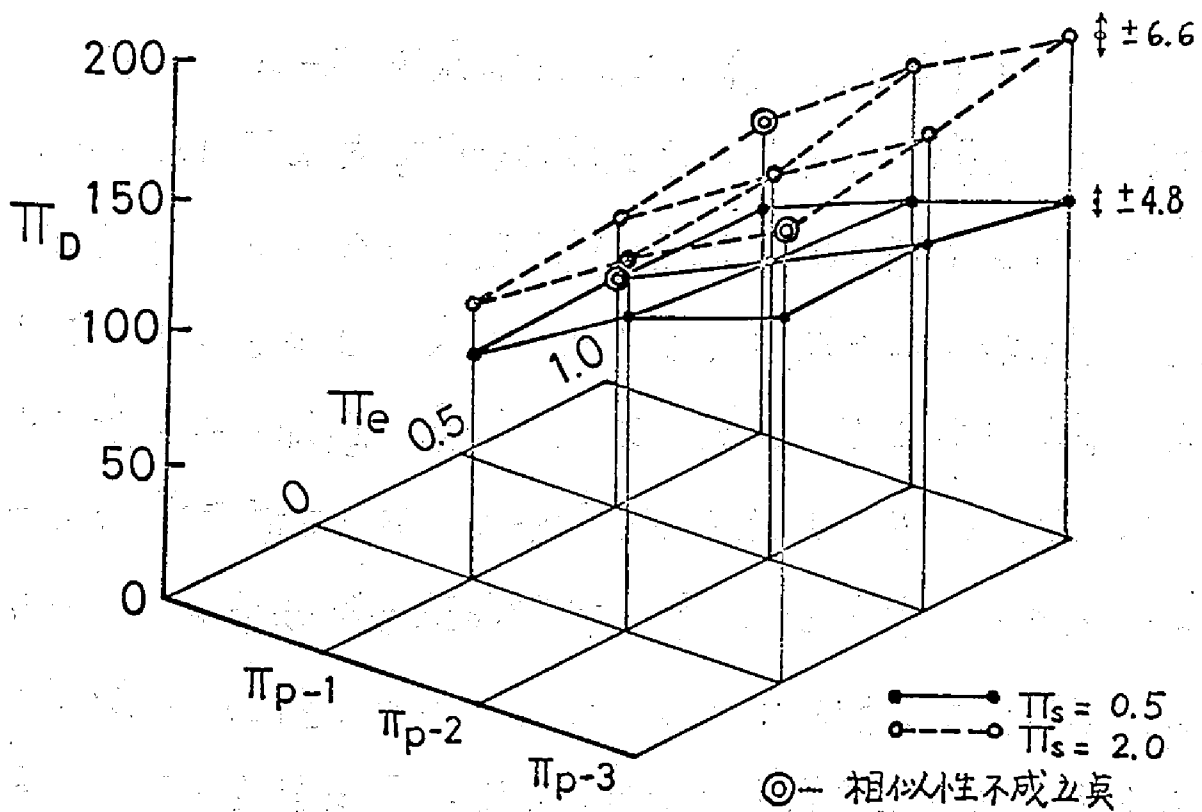
次に、 Π_e, Π_p の組合わせ条件別に Π_0 の母平均の推定を行なったが、ここでも同様に $\Pi_0 = 0.5, 2.0$ の場合の結果を図3-25に示す。図中 β は95%信頼区間を表わしているが、 Π_0 に対する Π_e, Π_p の関係はほぼ平面とみなすことができる。また、参考として相似性の成立しなかった Π_e, Π_p の組合わせについては、それらの母平均真と二重まるで囲って示した。 $\Pi_0 = 1.0, 1.5$ にお

表 3-27, (a), (b). 分散分析表

(a) $\pi_s = 0.5$					(b) $\pi_s = 2.0$			
SV	SS	DF	MS	F_0	SS	DF	MS	F_0
π_p	317.63	2	158.82	184.7**	657.00	2	328.50	184.9**
π_e	7.83	2	3.92	4.5*	35.07	2	17.54	9.87**
$\pi_p \times \pi_e$	5.18	4	1.30	1.5	1.66	4	0.42	0.234
誤差	61.94	72	0.86		127.91	72	1.78	
計	392.58	80			821.64	80		

* 危険率 5% で有意と認められた。

** 危険率 1% で有意と認められた。

図 3-25, $[\pi_D, \pi_p, \pi_e]$ 平面

ける結果は、図中の両面間に存在し、やはり平面に近似しているが、図が複雑になるため省略する。

5) 沈下に関する幾何学的相似性

流体力学の分野においては物体を固定し流体を動かす、たとえば風洞実験に見られるようなガリレオ変換が行なわれる。そうした実験を通じて、互いに相似な形状を持つ物体のまわりの流れや相似な流路の流れは、一般には相似にならない事が判明している⁷⁰⁾。すなわち、有名な Reynolds Number や Froude's Number の意義が明らかにされてきたのは、あくまでも、力学的に相似な流れとはいかなる条件を満足しているべきかを検討することから引き出されてきたものである。

いま、土-機械系の相似性の研究を概観する時、その主たるねらいは系の力学的相似性を満たすための条件を解明することであり、したがって力を従属変数(特性値)とするものばかりである。しかし、見方を度えて、機械が土に作用した結果として残る土の状態、換言すれば、機械の仕上げた仕事の内容について質量両面において予測ができれば、その価値は非常に大きい。力の予知が合理的設計に資すると同様、モデルから、たとえば碎土性能、うね・溝などの成形性能の予報が可能になれば、作物の生育に直接結びつく大きな成果であると言える。

この項のはじめの部分に流体力学における例を引用したのは、“力学的に相似であるための条件は必ずしも現象の幾何学

的相似を保障するものではない。”という点から、本研究においても出発しなければならないと考えるからである。

さて、上記の点に立ってモデル・シユ-の沈下についての結果をとりまとめ、その考察をする。

けん引に伴ないシユ-が沈下して行くことは既述の通りであるが、けん引を始める前の重錘載荷時に既にシユ-の沈下が生じている。各モデル・シユ-の沈下曲線について幾何学的相似性を厳密に検討するには、動的沈下に静的沈下を加味して行なうべきであろう。しかしながら、本実験の場合、人手によって重錘を載荷したため衝撃などによる静的沈下量への影響があり、以下の検討では動的沈下量のみを扱うことにする。そして、各シユ-の沈下状態が(3-35)式で示される条件下で相似であるかどうかを、順を追って検討する。動力学的相似性の検討におけると同様に、4点の *Homologous Points*、つまり4段階の Π_n について沈下状態を調べる。

1) 沈下量に対する各因子の影響

まず Σ に対する e , ρ , v の影響を4段階の Π_n について調べた。表 3-28 を見ると、 e の効果がきわめて大きく、 ρ が e に続くが、唯一の場合 ($S=2$, $\Pi_n=2.0$) を除き、 v の影響はないと考えてよい。これをけん引抵抗 D についての結果と比べると、 v については同じと言ってよいが、 ρ , e の D , Σ に対する影響度はその順位が逆である。すなわち、 D には ρ の、 Σ に対し

ては e の効果が非常に大きい。

Ⅴに対する v の効果がないものとして、 e 、 p と各3水準に設定した繰り返し3回の実験データとして検討をすすめる。

表 3-28, 分散分析結果

Π_s	0.5	1.0	1.5	2.0
S - 1	e**	e**, p*	e**, p*, exp*	e**, p**, exp*
S - 2	e**, p*	e**, p**	e**, p**	e**, p**, v*
S - 3	e**, p*	e**, p*	e**, p*	e**, p*

* 危険率 5% で有意と認められた。

** 危険率 1% で有意と認められた。

ii) 沈下曲線

記録された沈下曲線は、図 3-24 に例示したように、ほぼ直線状に経過するもののほか、指数曲線に近いとみなせるものがあった。そこで、各モデル・シユ-別に、 $\Pi_e = \frac{\pi}{4}$ が4段階の Π_e の各値について差があるかどうか、換言すれば、沈下が一定の勾配によって生じているかどうかを、分散分析法により調べて見た。その結果(表 3-29)、次の実が明らかになった。

A). $\Pi_e = 0$, つまり、シユ-間隙がまったくない場合の沈下曲線は、 $\Pi_e = 0.5 \sim 2.0$ の範囲内に関する限り、どのモデル・シユ-においても直線と考えてよい。

B). シユ-間隙を与えると、シユ-の移動につれ、 Π_e が明らかに変わる例が出現した。特に、S-1 の $\Pi_e = 1.0$ では、 Π_p の

どの水準についても Π_E に有意差が認められた。その反面、最も小さな S-3 の $\Pi_E = 1.0$ では沈下は直線状であることが示されており、モデルの大きさ、 Π_p の水準および Π_E の各段階に関して、 Π_E の有意差の認められる場合についての共通点は見られない。

表 3-29. 分散分析結果

Π_E		0	0.5	1.0
S - 1	Π_p-1	-	*	**
	Π_p-2	-	-	**
	Π_p-3	-	-	*
S - 2	Π_p-1	-	**	-
	Π_p-2	-	-	**
	Π_p-3	-	-	*
S - 3	Π_p-1	-	*	-
	Π_p-2	-	-	-
	Π_p-3	-	*	-

- 有意差なし。
 * 危険率5%で有意。
 ** 危険率1%で有意。

iii) 沈下に関する幾何学的相似性

各モデル・シユーに関して、同じ Π_p 値にあたる各水平移動距離 Δ における Π_E は、シユーが動的沈下を始めるに至るまでの平均沈下勾配を意味している。したがって、各モデル間で Π_E に有意差がなければ、沈下に関する幾何学的相似性が成立していることになる。分散分析の結果は、表 3-30 の通りである。

表 3-30, 分散分析結果

Π_s		0.5	1.0	1.5	2.0
$\Pi_e=0$	Π_{p-1}	-	-	-	-
	Π_{p-2}	-	-	-	-
	Π_{p-3}	-	-	-	-
$\Pi_e=0.5$	Π_{p-1}	*	*	*	-
	Π_{p-2}	-	-	-	-
	Π_{p-3}	*	-	-	-
$\Pi_e=1.0$	Π_{p-1}	-	-	-	-
	Π_{p-2}	**	-	*	*
	Π_{p-3}	-	-	-	-

- 有意差なしと認められた。

* 危険率 5% で有意と認められた。

** 危険率 1% で有意と認められた。

$\Pi_e=0$ では, Π_p の水準に拘わらず 4カ所の Homologous Points (Π_s) で, モデルシユ-間に Π_s の有意差は認められない。少なくとも, $\Pi_s=0 \sim 2.0$ では, 各モデルは相互に相似な沈下現象を示したと言える。ところが, $\Pi_e=0.5, 1.0$ では, 沈下に関して非相似現象を呈した場合が出現した。その現象が特徴的な $\Pi_e=0.5$ における Π_{p-1} , $\Pi_e=1.0$ における Π_{p-2} の場合について, 動力学的相似性の成立との関係を表 3-29 より引用し, 表示してみると次のようである。

表 3-31 より, 両相似性に関して二つの場合が見られる。すなわち, 両者ともその相似性の成立の有無について同じ結果を示している例と, 両者の間に明らかな相異がある場合である。

表 3-31. 動力学的相似性と幾何学的相似性

系の種類	相 似 性	Π_s			
		0.5	1.0	1.5	2.0
① $\Pi_e = 0.5$ Π_p^{-1}	動力学的相似性	*	-	-	-
	幾何学的相似性	*	*	*	-
② $\Pi_e = 1.0$ Π_p^{-2}	動力学的相似性	-	*	*	-
	幾何学的相似性	**	-	*	*

- 有意差なし。モデル・シュール間に差はなく、相似性が成立している。

* 危険率5%で有意、すなわち、モデル・シュール間に差が認められる。

** 危険率1%で有意、すなわち、モデル・シュール間に高度の差が認められる。

そして、表に示した例では、①の系における $\Pi_s = 2.0$ の場合のみが両相似性を満足しているのみであって、総合的に見れば、沈下に関する相似性は、動力学的相似性が成立しているからといって、必ずしも成立しないと言うことを指摘できる。

以上はあくまでも特徴的な場合を例示した訳であるが、全体については、表3-29と表3-30とを照合すればよい。 $\Pi_e = 0$ の場合には12ケースのうち2ケース、 $\Pi_e = 0.5$ の場合には12ケース中5ケース、そして $\Pi_e = 1.0$ の場合には12ケース中6ケースが、両相似性の同時成立を示していない。

シュール間隙を設けると、両相似性が同時には成立しにくくなるということは、抵抗及び沈下に及ぼすシュール間隙の影響の仕方がモデルのサイズによって変えることを意味している。つまり、具体的には、縮尺比 n によってシュール間隙を設定したと

しても、せん引時シュ―間隙によって影響される砂の応力、砂の変位、流動が非相似であると解釈される。

流体力学では、流体の粘性により系の1点に作用する力の平衡、すなわち、正味圧力、慣性力および粘性抵抗の各分力が決定されるとともに、流体の流動パターンも粘性に大きく影響されるから、両相似性は一般には成立しないと言われている⁷¹⁾。よって、粘着性を持つ一般土壌を対象として同様の実験が行なわれるとするならば、多分、本実験の乾燥砂における結果とは異なり、両相似性の同時成立というケースは望めないであろう。

6) π_z と π_e, π_p の関係

π_z と π_e, π_p の関係を調べた方法と同じ手法で π_z の母平均の推定を行ない、 $\pi_d = 0.5$ における π_e, π_p との関係を図3-26に例示する。 π_e, π_p とともに危険率1%で π_z に対する効果が認められたが、図より

明らかなように、 π_e による影響が特に大きい。その他の π_d についても、同様の結果が得られている。

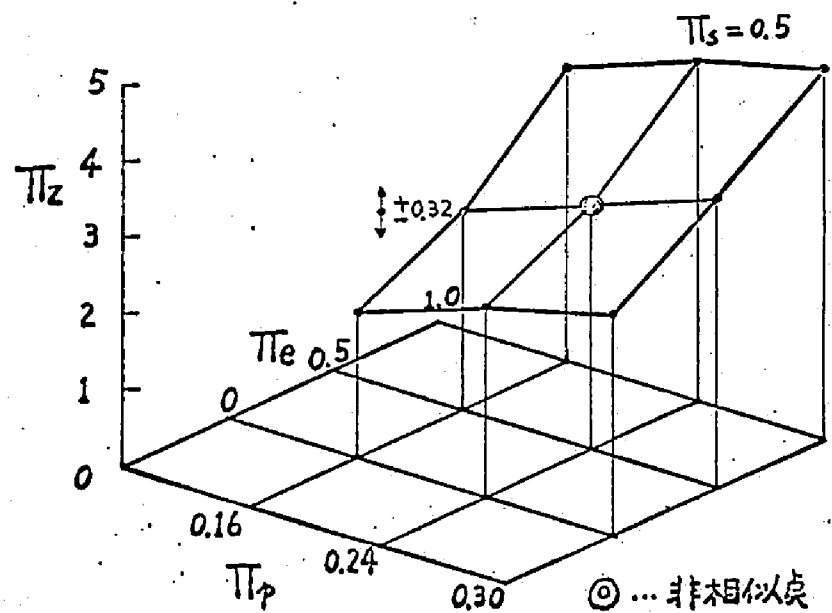


図3-26, $[\pi_z, \pi_e, \pi_p]$ 平面

7) 要約

互いに相似な形状を持つ3種のモデル・シユー S-1, S-2, S-3 を, 図3-22に示す状態で, 乾燥砂中をけん引した場合の, 動力学的相似性ならびに沈下曲線の幾何学的相似性に関する実験を行なった。前者においてはシユーのけん引抵抗 D を, 後者においてはシユーの沈下量 Σ を特性値として採り上げ, 表3-20に示す相似条件下において, 以下の諸臭が少なくとも信頼係数95%で言明できることが判明した。

1) 乾燥砂-排土板系におけると同様, 本実験の対象とした系においても, $\Pi_D = D/(\rho g l^3) = \text{constant}$ であり, けん引抵抗はシユーのサイズ³の3乗に比例する。

2) 本実験でモデル・シユーを与えた速度領域では, v が D および Σ に及ぼす影響は λ の大きさによらず無視できる。

3) D に対しては ϕ の, Σ には e の影響がきわめて大きい。

4) v の影響がないことから, Π_e, Π_ϕ を各3水準にし, 繰り返し3回の実験を各モデル・シユーについて行なったものとして考えた。 Π_e, Π_ϕ の各組合わせ条件下のモデル・シユーは, その各々が固有の乾燥砂-モデル・シユー系であるから, 計9個の系に関して相似性成立の有無を4段階の Π_λ について検討した結果, 次の臭が明らかになった。

A) 動力学的相似性について

表3-29に示されるように, 本実験で設定した相似条件

下では、大部分の系において動力学的相似性が成立した。相似性不成立の出現傾向を見ると、 $\Pi_0 = 1.5$ 以後に多く、けん引開始前のシユーの初期条件の差がシユーの進行につれて拡大し、抵抗Dに影響を与えたものと思われる。

B) 沈下に関する幾何学的相似性について

シユー間隙を与えない系では、相似性が成立した。沈下に関しては、シユー間隙が相似性の成立、不成立の Key Factor である。動力学的相似性ととも幾何学的相似性が成立するのは、 $\Pi_e = 0$ の系であり、これは、粘着性を持たない乾燥砂においてのみ成立するのではないかと、この推断がなされた。

5) Π_0 および Π_z と Π_e, Π_p との関係

Π_0, Π_z は Π_e, Π_p によって変化するが、両者の交互作用は認められず、ほぼ平面を形成するとみなしてよい。

(2) シユーの形状がけん引抵抗に及ぼす影響

相似性に関する実験では、 l, b, h が $2:6:1$ という一定の比を持つモデルシユーについて相似性成立の有無を、 e, ν の組合わせの各系について調べ、ついで Π 値が Π_e, Π_p によりどのように変わるかを検討した。H, B系は、具体的には、 h, b をそれぞれ変えているから、けん引抵抗はその形状によって当然影響を受けると考えられるが、 ν, ρ, e という条件による影響も考慮しなければならない。すなわち、けん引抵抗の

総変動を、形状による変動、 v , ϕ , e によるそれぞれの変動および実験の誤差変動に分離し、各変動の有意性、換言すれば影響度を明らかにしなければならない。たとえば、H系のシユーは、けん引速度、接地圧、シユー間隙のいかなる条件下で、 ϕ のけん引抵抗に及ぼす影響が顕著であるかといった結果を抽出することが課題である。以下、順を追って検討を進める。

1) シユー各系における v , ϕ , e の影響

いま、H-2, B-2 を例にとって、けん引抵抗に及ぼす v , ϕ , e の影響を見てみよう。表 3-32 は H-2, B-2 についての v , ϕ , e 各3水準におけるけん引抵抗である。表を概観して、両シユーについて ϕ の影響は明らかであるが、 v , e による影響は複雑である。 v , e のうち、 v については、相似性に関する実験結果からその影響を無視できるものとし、 ϕ , e を各3水準に変えた二元配置法として分散分析をした結果を表 3-33 に示す。H-2, B-2 とも、 ϕ が 99% の信頼係数を以って有意であり、 e については H-2 で 95%, B-2 では 99% の信頼係数で有意であることが認められた。 ϕ と e の交互作用、 $\phi \times e$ はいずれも有意でなかったため、プーリング (Pooling) をして分散分析を行なったが、その結果には変化はなかった。

同様の方法ですべての H 系, B 系シユーについて分散分析をした結果を表 3-34 に示す。

表 3-32, けん引抵抗測定値 (kg)

		H - 2			B - 2		
e	v	p-1	p-2	p-3	p-1	p-2	p-3
e-1	v-1	30.1	38.2	48.3	24.1	30.5	38.6
	v-2	30.5	37.7	45.8	22.8	32.2	39.5
	v-3	27.1	42.0	44.5	23.2	29.6	34.4
e-2	v-1	29.7	40.7	48.3	22.8	32.2	36.9
	v-2	31.4	41.1	46.6	21.5	30.1	36.5
	v-3	30.5	40.3	46.8	22.8	30.5	34.8
e-3	v-1	31.8	39.9	42.8	22.8	29.6	34.4
	v-2	30.3	38.5	40.7	23.6	28.8	32.2
	v-3	29.4	37.5	43.2	17.6	29.0	33.1

表 3-33, 分散分析表

(H - 2)

SV	SS	DF	MS	F ₀	F(0.01)	F(0.05)
p	1049.2	2	524.6	244.0**	6.01	3.55
e	24.8	2	12.4	5.76*	6.01	3.55
p x e	26.2	4	6.6	3.05*	4.58	2.93
誤差	38.7	18	2.2			
計	1138.9	26				

(B - 2)

SV	SS	DF	MS	F ₀	F(0.01)	F(0.05)
p	799.5	2	399.7	145.9**	6.01	3.55
e	33.4	2	16.7	6.1**	6.01	3.55
p x e	7.0	4	1.7	0.6	4.58	2.93
誤差	49.3	18	2.7			
計	889.2	26				

表3-34, 分散分析結果

H - 1	p**	B - 1	p**
H - 2	p**, e*	B - 2	p**, e**
H - 3	p**, e**	B - 3	p**

* 危険率5%で有意と認められた。

** 危険率1%で有意と認められた。

H系, B系を総合的に見ると, H系では h の小さいシュー
ほど, e のけん引抵抗に及ぼす影響は顕著である。B系につ
いては, e はB-2シューのみで有意であり, 明らかな傾向はない。
両系について, μ は明白な影響があることを示している。

2) H系, B系における h, b の効果

H系は h, b を一定とし h のみを変え, B系は h, b を
一定として b のみを変えて, μ, e の各組合わせ条件下で各け
ん引抵抗値を求めたのであるが, H系では h , B系では b の
けん引抵抗に対する効果を, μ, e の影響を含め検討する。H
系については h, μ, e , B系については b, μ, e を各3水
準ずつ, 繰り返しの三元配置法により分散分析をした結果
を表3-35に示す。

H系では, $h, \mu, e, h \times \mu, h \times e$ が, B系では $b, \mu, b \times \mu$ が, 危険率1%で有意であることが認められたが, その効
果の大きさは寄与率(Contribution Factor)により知ることが
できる。

表 3-35, 分散分析表
(H系₂₋₁)

SV	SS	DF	MS	F ₀	CF(%)
H	695.9	2	347.9	117.8**	16.4
p	3065.5	2	1532.7	518.8**	72.0
e	89.7	2	44.8	15.2**	2.1
H x p	50.5	4	12.6	4.3**	1.2
H x e	152.4	4	38.1	12.9**	3.6
p x e	20.0	4	5.0	1.7	0.5
H x p x e	23.2	8	2.9	1.0	0.5
誤差	159.5	54	3.0		3.8
計	4256.6	80			100.0

(B系₂₋₁)

SV	SS	DF	MS	F	CF(%)
B	4000.2	2	2000.1	603.1**	58.9
p	2426.6	2	1213.3	365.8**	35.7
e	11.1	2	5.6	1.7	0.2
B x p	138.0	4	32.5	9.8**	1.9
B x e	30.1	4	7.5	2.3	0.4
p x e	5.7	4	1.4	0.4	0.1
B x p x e	12.8	8	1.7	0.5	0.2
誤差	179.1	54	3.3		2.6
計	6795.4	80			100.0

更に, 母平均値の推定を行ない, e-1, e-3 の場合を図 3-27 に示す。図中の格子表はそれぞれ a-p, b-p の組合わせ状態における母平均値を示し, 99% の信頼区間にして, $\pm 1.84 \sim \pm 2.49$ (kg), 平均 ± 2.07 (kg), 95% の信頼区間にして, $\pm 1.34 \sim \pm 1.82$

(kg), 平均 ± 1.51 (kg) という中を持っている。e-2, すなわち $e = 3\text{ cm}$ の場合は, H, B 両系とも図に示された e-1, e-3 の場合の両平面間に存在し, いずれも平面に近い。

H 系では, けん引抵抗に対して p の影響が頗る大きく, ρ による効果は微弱である。これに対し, B 系では, p, ρ ともけん引抵抗と密接な関係を持っていることがわかる。

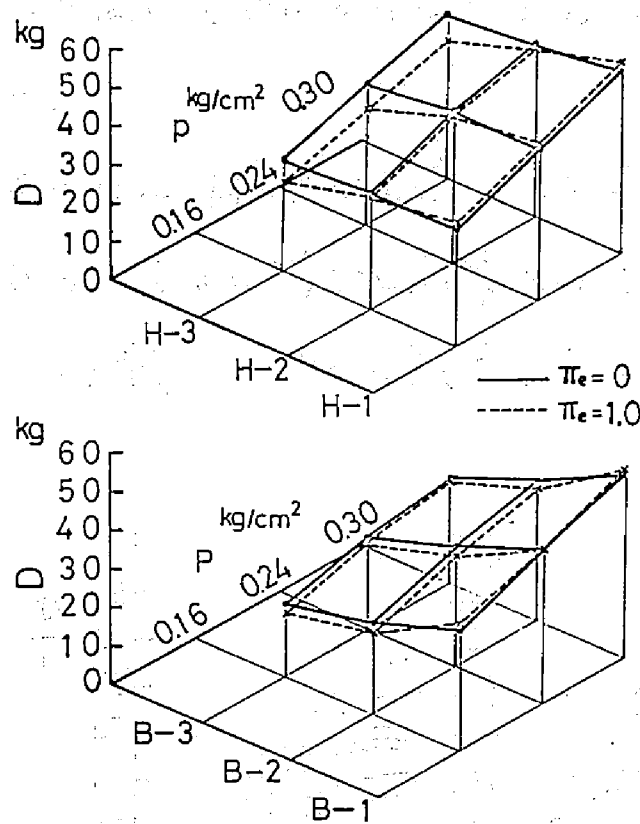


図 3-27, 抵抗と各因子の関係
(図中の点は無平均推定値)

いま, 最も小さな寸法を持つ H-3, B-3 のけん引抵抗を基準にとり, これを D_3 と表わし, その D_3 とその他のシユーへのけ

けん引抵抗 D との比を縦軸にとり、横軸にはそれぞれ高さスケール (Height Scale) および巾スケール (Breadth Scale) をとって、 e 、 μ をパラメータとして図を描いて見ると、上述の傾向がより一層具体的に示される (図 3-28)。すなわち、 μ を 3 倍にしてもシユ-間隙がない場合には、ほとんどけん引抵抗の増加はなく精々 1 割以内であるが、シユ-間隙を大きくすると最高 1.5 倍のけん引抵抗が得られた。そして、どのシユ-間隙の場合にも、接地圧の低い場合ほどけん引抵抗の増加は大きい傾向があると言える。

巾によるけん引抵抗の増減は、おおむね直線状と表現することができる。高さの場合と同様低接地圧ほど巾の効果が大きい。シユ-間隙との間には顕著な差は見られない。

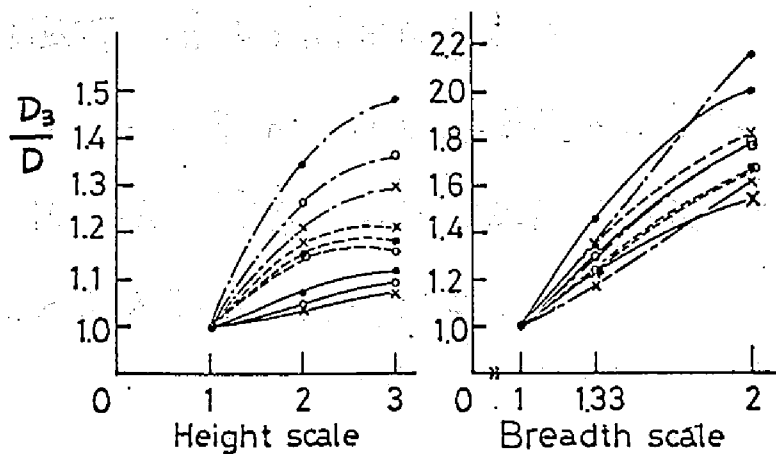


図 3-28, シユ-の高さ、巾と抵抗の関係

—	$e = 0.0$	●	$\mu = 0.16$
- - -	$e = 0.5$	○	$\mu = 0.24$
- · - · -	$e = 1.0$	×	$\mu = 0.30$

3) 要約

1) 形状の異なるシユーのけん引抵抗に及ぼす接地圧およびシユー間隙の影響を個々のシユーについて調べると、接地圧の影響は最も大きいことがすべてのシユーについて言える。シユー間隙の効果は、H系では α の小さいシユーほど顕著であることが判明したが、B系についてはB-2以外のシユーでは明らかではない。

2) H, B両系におけるけん引抵抗に及ぼす α , β の効果と調べた結果、以下の実が明らかにされた。

i) α の効果はシユー間隙 e を大きくする場合に発揮され、本実験の条件下では最大約1.5倍のけん引抵抗の増加をみた。

ii) どのシユー間隙の水準においても、接地圧が低いほど、けん引抵抗の増加の割合は大きい。

iii) シユーの中 β のけん引抵抗への効果は、ほぼ直線的関係で示され、 α と同様、低接地圧ほど抵抗増加が大きい。シユー間隙による顕著な変動はない。

§5 実験〔3〕——乾燥砂および人工土—ロータリ系——

本章は大別して、次の二つの実験より成る。

A 人工土に関する実験

B 乾燥砂と人工土を利用したロータリの相似性実験

自然土壌を用いた実験では、その対象とする土の状態をコントロールすることが困難であり、実験の再現性が低いことが大きな障害となっている。本研究の実験〔1b〕においても、塑性限界付近の土D、Eでは、上記の事が特に顕著であり、モデルから実物に対する予報精度も極めて低いものであった。

そうした事態に対処するために自然土壌の代りに人工土を利用して、ロータリ耕うん具の相似性に関する実験を行なうことにした。「Ⅱ章 §5, 従来の研究」において述べたように、国外では種々の組成を持つ人工土が調製され、その性質が調べられているが、わが国では初めての試みであるため、先ず、人工土に関する基礎的な実験を行ない、その結果をふまえて、ロータリの相似性に関する実験に着手した。ただし、人工土に関する実験は、あくまで本論文においては副次的なものであるから、簡単に記述することにした。

(1) 人工土の組成とせん断特性

1. 目的

既にⅢ章において触れたように、従来から試作調製された人工土は、砂、粘土の鉱物粒子と不揮発性液体から成る混合物である。本実験の目的はそうした組成成分として比較的入手し易いものを選定し、調製した人工土のせん断特性値を次に列挙する各因子に関して検討する。

① 不揮発性液体（本実験ではオイルである）の種類

② 砂の種類

③ 粘土の有無

④ オイル含有量

2 方法

1) せん断試験

せん断箱直径100 mm, 油圧駆動型の一面せん断試験機（丸東製作所製）を使用した。せん断速度を1.9~2.6 mm/sec とし、垂直圧力は0.5 kg/cm² きざみで3.5 kg/cm² までのうち5段階について測定を行なった。

2) 供試人工土

表3-36に示す7種類の人工土を調製し、せん断試験に供した。ベントナイトは豊順(株)製、穂高印を、砂質ロームについては、実験〔1b〕に供試したものを使用した。ベントナイトと砂の混合割合は、A. Y. Korayem の研究³⁹⁾を参考にして等量とし

た。

表 3-36, 供試人工土の組成

人工土	粘土	砂	オイル	含油率 (重量パーセント)
A	なし	標準砂	10W モータ・オイル	4.3, 8.1, 11.7, 15.0, 18.1
B	なし	砂質ローム	10W モータ・オイル	13.0, 16.7, 18.4
C	ベントナイト	標準砂	10W モータ・オイル	22.7
D	ベントナイト	標準砂	90W シリンダ・オイル	22.5
E	ベントナイト	北白川砂	10W モータ・オイル	22.7
F	ベントナイト	北白川砂	40W モータ・オイル	22.5
G	ベントナイト	北白川砂	90W シリンダ・オイル	15.0, 22.5, 24.2, 26.9

3) 測定結果の処理方法

分散分析法を用い, τ , c , ϕ への各因子の影響を調べ, 有意であると認められる場合には, 母平均の推定を行ない, その結果から情報を抽出した。

3 結果

1) オイルの種類によるせん断特性への効果

人工土 E, F, G の結果を検討すれば, オイルの種類によるせん断特性への効果を知ることができる。

せん断抵抗 τ は危険率 5% で有意であるが, 母平均の推定値の差を検定すると, 90W と 40W モータ・オイル間には差がない。

内部摩擦角 ϕ 中はオイルの種類に拘わらず, 約 30° と一定である。

粘着力は、10Wオイルで 0.155 kg/cm^2 、40W、90Wオイルでは $0.46 \sim 0.47 \text{ kg/cm}^2$ を示し、オイルによる差が認められた。

2) 砂の種類によるせん断特性への効果

いずれも10Wモータオイルを用いた人工土A, B, Eについて、ほぼ同じ含油率の状態に関して分析した結果、 τ , c , ϕ ともに有意差は認められなかった。

3) ベントナイトの有無によるせん断特性への効果

やや含油率には差があるが、同じ10Wオイルの、人工土Aの18.4%のものと、人工土Cの22.7%のものとを検討した結果、 τ には危険率1%で高度の効果があるが、 ϕ には効果がなく、 c については大いに効果が認められた。

4) オイル含有率によるせん断特性への効果

人工土Gについて、せん断速度を0.11, 2.40, 9.39 (mm/sec)の3段階、垂直圧力を5段階に変えた場合の含油率の影響を分散分析を通じて検討した結果、含油率の τ , c , ϕ に及ぼす効果が非常に大きいことが判明した。母平均の推定から、 τ は含油率22.5%のサンプルで最大値を示し、 ϕ は含油率15~22.5%では 31° と変わらないが、それ以上の含油率では次第に減少し、ついには零近くに達することがわかった。 c は含油率24.2%でピークを示し、その状態では $\phi = 16.1^\circ$, $c = 0.59 \text{ kg/cm}^2$ であった。

以上を総括すれば、オイルは10Wオイルと40W, 90Wオイルとでは、せん断特性値に明らかに差を生じ、砂については差がない。また、ベントナイトを用いるか否かは、Cについて大いに影響があり、オイルの含油率を変えることにより種々の強さを持つ人工土を作ることが可能であると言える。

1. 總策：「總策：天下之理，不外乎一。」

$$\begin{array}{ccccccc} \mathbb{R} & \xrightarrow{\quad \cdot \quad} & \mathbb{R} & \xrightarrow{\quad \cdot \quad} & \mathbb{R} & \xrightarrow{\quad \cdot \quad} & \mathbb{R} \\ \mathbb{R} & \xrightarrow{\quad \cdot \quad} & \mathbb{R} & \xrightarrow{\quad \cdot \quad} & \mathbb{R} & \xrightarrow{\quad \cdot \quad} & \mathbb{R} \end{array}$$

1. 本報刊載之廣告，其內容如有違反法律或社會公德者，本報得隨時撤銷之，並得向有關機關檢舉。
 2. 本報刊載之廣告，其內容如有虛假或誇大者，本報得隨時撤銷之，並得向有關機關檢舉。
 3. 本報刊載之廣告，其內容如有侵害他人名譽或隱私者，本報得隨時撤銷之，並得向有關機關檢舉。
 4. 本報刊載之廣告，其內容如有違反國家安全或社會秩序者，本報得隨時撤銷之，並得向有關機關檢舉。
 5. 本報刊載之廣告，其內容如有違反國際公約或條約者，本報得隨時撤銷之，並得向有關機關檢舉。
 6. 本報刊載之廣告，其內容如有違反本報之廣告刊例者，本報得隨時撤銷之，並得向有關機關檢舉。
 7. 本報刊載之廣告，其內容如有違反本報之廣告刊例者，本報得隨時撤銷之，並得向有關機關檢舉。
 8. 本報刊載之廣告，其內容如有違反本報之廣告刊例者，本報得隨時撤銷之，並得向有關機關檢舉。
 9. 本報刊載之廣告，其內容如有違反本報之廣告刊例者，本報得隨時撤銷之，並得向有關機關檢舉。
 10. 本報刊載之廣告，其內容如有違反本報之廣告刊例者，本報得隨時撤銷之，並得向有關機關檢舉。

1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025, 2026, 2027, 2028, 2029, 2030, 2031, 2032, 2033, 2034, 2035, 2036, 2037, 2038, 2039, 2040, 2041, 2042, 2043, 2044, 2045, 2046, 2047, 2048, 2049, 2050, 2051, 2052, 2053, 2054, 2055, 2056, 2057, 2058, 2059, 2060, 2061, 2062, 2063, 2064, 2065, 2066, 2067, 2068, 2069, 2070, 2071, 2072, 2073, 2074, 2075, 2076, 2077, 2078, 2079, 2080, 2081, 2082, 2083, 2084, 2085, 2086, 2087, 2088, 2089, 2090, 2091, 2092, 2093, 2094, 2095, 2096, 2097, 2098, 2099, 2100, 2101, 2102, 2103, 2104, 2105, 2106, 2107, 2108, 2109, 2110, 2111, 2112, 2113, 2114, 2115, 2116, 2117, 2118, 2119, 2120, 2121, 2122, 2123, 2124, 2125, 2126, 2127, 2128, 2129, 2130, 2131, 2132, 2133, 2134, 2135, 2136, 2137, 2138, 2139, 2140, 2141, 2142, 2143, 2144, 2145, 2146, 2147, 2148, 2149, 2150, 2151, 2152, 2153, 2154, 2155, 2156, 2157, 2158, 2159, 2160, 2161, 2162, 2163, 2164, 2165, 2166, 2167, 2168, 2169, 2170, 2171, 2172, 2173, 2174, 2175, 2176, 2177, 2178, 2179, 2180, 2181, 2182, 2183, 2184, 2185, 2186, 2187, 2188, 2189, 2190, 2191, 2192, 2193, 2194, 2195, 2196, 2197, 2198, 2199, 2200, 2201, 2202, 2203, 2204, 2205, 2206, 2207, 2208, 2209, 2210, 2211, 2212, 2213, 2214, 2215, 2216, 2217, 2218, 2219, 2220, 2221, 2222, 2223, 2224, 2225, 2226, 2227, 2228, 2229, 2230, 2231, 2232, 2233, 2234, 2235, 2236, 2237, 2238, 2239, 2240, 2241, 2242, 2243, 2244, 2245, 2246, 2247, 2248, 2249, 2250, 2251, 2252, 2253, 2254, 2255, 2256, 2257, 2258, 2259, 2260, 2261, 2262, 2263, 2264, 2265, 2266, 2267, 2268, 2269, 2270, 2271, 2272, 2273, 2274, 2275, 2276, 2277, 2278, 2279, 2280, 2281, 2282, 2283, 2284, 2285, 2286, 2287, 2288, 2289, 2290, 2291, 2292, 2293, 2294, 2295, 2296, 2297, 2298, 2299, 2300, 2301, 2302, 2303, 2304, 2305, 2306, 2307, 2308, 2309, 2310, 2311, 2312, 2313, 2314, 2315, 2316, 2317, 2318, 2319, 2320, 2321, 2322, 2323, 2324, 2325, 2326, 2327, 2328, 2329, 2330, 2331, 2332, 2333, 2334, 2335, 2336, 2337, 2338, 2339, 2340, 2341, 2342, 2343, 2344, 2345, 2346, 2347, 2348, 2349, 2350, 2351, 2352, 2353, 2354, 2355, 2356, 2357, 2358, 2359, 2360, 2361, 2362, 2363, 2364, 2365, 2366, 2367, 2368, 2369, 2370, 2371, 2372, 2373, 2374, 2375, 2376, 2377, 2378, 2379, 2380, 2381, 2382, 2383, 2384, 2385, 2386, 2387, 2388, 2389, 2390, 2391, 2392, 2393, 2394, 2395, 2396, 2397, 2398, 2399, 2400, 2401, 2402, 2403, 2404, 2405, 2406, 2407, 2408, 2409, 2410, 2411, 2412, 2413, 2414, 2415, 2416, 2417, 2418, 2419, 2420, 2421, 2422, 2423, 2424, 2425, 2426, 2427, 2428, 2429, 2430, 2431, 2432, 2433, 2434, 2435, 2436, 2437, 2438, 2439, 2440, 2441, 2442, 2443, 2444, 2445, 2446, 2447, 2448, 2449, 2450, 2451, 2452, 2453, 2454, 2455, 2456, 2457, 2458, 2459, 2460, 2461, 2462, 2463, 2464, 2465, 2466, 2467, 2468, 2469, 2470, 2471, 2472, 2473, 2474, 2475, 2476, 2477, 2478, 2479, 2480, 2481, 2482, 2483, 2484, 2485, 2486, 2487, 2488, 2489, 2490, 2491, 2492, 2493, 2494, 2495, 2496, 2497, 2498, 2499, 2500, 2501, 2502, 2503, 2504, 2505, 2506, 2507, 2508, 2509, 2510, 2511, 2512, 2513, 2514, 2515, 2516, 2517, 2518, 2519, 2520, 2521, 2522, 2523, 2524, 2525, 2526, 2527, 2528, 2529, 2530, 2531, 2532, 2533, 2534, 2535, 2536, 2537, 2538, 2539, 2540, 2541, 2542, 2543, 2544, 2545, 2546, 2547, 2548, 2549, 2550, 2551, 2552, 2553, 2554, 2555, 2556, 2557, 2558, 2559, 2560, 2561, 2562, 2563, 2564, 2565, 2566, 2567, 2568, 2569, 2570, 2571, 2572, 2573, 2574, 2575, 2576, 2577, 2578, 2579, 2580, 2581, 2582, 2583, 2584, 2585, 2586, 2587, 2588, 2589, 2590, 2591, 2592, 2593, 2594, 2595, 2596, 2597, 2598, 2599, 2600, 2601, 2602, 2603, 2604, 2605, 2606, 2607, 2608, 2609, 2610, 2611, 2612, 2613, 2614, 2615, 2616, 2617, 2618, 2619, 2620, 2621, 2622, 2623, 2624, 2625, 2626, 2627, 2628, 2629, 2630, 2631, 2632, 2633, 2634, 2635, 2636, 2637, 2638, 2639, 2640, 2641, 2642, 2643, 2644, 2645, 2646, 2647, 2648, 2649, 2650, 2651, 2652, 2653, 2654, 2655, 2656, 2657, 2658, 2659, 2660, 2661, 2662, 2663, 2664, 2665, 2666, 2667, 2668, 2669, 2670, 2671, 2672, 2673, 2674, 2675, 2676, 2677, 2678, 2679, 2680, 26

• **Stress** is a response to a stimulus that is perceived as a threat to well-being.

1998, 1999, 2000, 2001, 2002, 2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024, 2025, 2026, 2027, 2028, 2029, 2030, 2031, 2032, 2033, 2034, 2035, 2036, 2037, 2038, 2039, 2040, 2041, 2042, 2043, 2044, 2045, 2046, 2047, 2048, 2049, 2050, 2051, 2052, 2053, 2054, 2055, 2056, 2057, 2058, 2059, 2060, 2061, 2062, 2063, 2064, 2065, 2066, 2067, 2068, 2069, 2070, 2071, 2072, 2073, 2074, 2075, 2076, 2077, 2078, 2079, 2080, 2081, 2082, 2083, 2084, 2085, 2086, 2087, 2088, 2089, 2090, 2091, 2092, 2093, 2094, 2095, 2096, 2097, 2098, 2099, 2100, 2101, 2102, 2103, 2104, 2105, 2106, 2107, 2108, 2109, 2110, 2111, 2112, 2113, 2114, 2115, 2116, 2117, 2118, 2119, 2120, 2121, 2122, 2123, 2124, 2125, 2126, 2127, 2128, 2129, 2130, 2131, 2132, 2133, 2134, 2135, 2136, 2137, 2138, 2139, 2140, 2141, 2142, 2143, 2144, 2145, 2146, 2147, 2148, 2149, 2150, 2151, 2152, 2153, 2154, 2155, 2156, 2157, 2158, 2159, 2160, 2161, 2162, 2163, 2164, 2165, 2166, 2167, 2168, 2169, 2170, 2171, 2172, 2173, 2174, 2175, 2176, 2177, 2178, 2179, 2180, 2181, 2182, 2183, 2184, 2185, 2186, 2187, 2188, 2189, 2190, 2191, 2192, 2193, 2194, 2195, 2196, 2197, 2198, 2199, 2200, 2201, 2202, 2203, 2204, 2205, 2206, 2207, 2208, 2209, 2210, 2211, 2212, 2213, 2214, 2215, 2216, 2217, 2218, 2219, 2220, 2221, 2222, 2223, 2224, 2225, 2226, 2227, 2228, 2229, 2230, 2231, 2232, 2233, 2234, 2235, 2236, 2237, 2238, 2239, 2240, 2241, 2242, 2243, 2244, 2245, 2246, 2247, 2248, 2249, 2250, 2251, 2252, 2253, 2254, 2255, 2256, 2257, 2258, 2259, 2260, 2261, 2262, 2263, 2264, 2265, 2266, 2267, 2268, 2269, 2270, 2271, 2272, 2273, 2274, 2275, 2276, 2277, 2278, 2279, 2280, 2281, 2282, 2283, 2284, 2285, 2286, 2287, 2288, 2289, 2290, 2291, 2292, 2293, 2294, 2295, 2296, 2297, 2298, 2299, 2300, 2301, 2302, 2303, 2304, 2305, 2306, 2307, 2308, 2309, 2310, 2311, 2312, 2313, 2314, 2315, 2316, 2317, 2318, 2319, 2320, 2321, 2322, 2323, 2324, 2325, 2326, 2327, 2328, 2329, 2330, 2331, 2332, 2333, 2334, 2335, 2336, 2337, 2338, 2339, 2340, 2341, 2342, 2343, 2344, 2345, 2346, 2347, 2348, 2349, 2350, 2351, 2352, 2353, 2354, 2355, 2356, 2357, 2358, 2359, 2360, 2361, 2362, 2363, 2364, 2365, 2366, 2367, 2368, 2369, 2370, 2371, 2372, 2373, 2374, 2375, 2376, 2377, 2378, 2379, 2380, 2381, 2382, 2383, 2384, 2385, 2386, 2387, 2388, 2389, 2390, 2391, 2392, 2393, 2394, 2395, 2396, 2397, 2398, 2399, 2400, 2401, 2402, 2403, 2404, 2405, 2406, 2407, 2408, 2409, 2410, 2411, 2412, 2413, 2414, 2415, 2416, 2417, 2418, 2419, 2420, 2421, 2422, 2423, 2424, 2425, 2426, 2427, 2428, 2429, 2430, 2431, 2432, 2433, 2434, 2435, 2436, 2437, 2438, 2439, 2440, 2441, 2442, 2443, 2444, 2445, 2446, 2447, 2448, 2449, 2450, 2451, 2452, 2453, 2454, 2455, 2456, 2457, 2458, 2459, 2460, 2461, 2462, 2463, 2464, 2465, 2466, 2467, 2468, 2469, 2470, 2471, 2472, 2473, 2474, 2475, 2476, 2477, 2478, 2479, 2480, 2481, 2482, 2483, 2484, 2485, 2486, 2487, 2488, 2489, 2490, 2491, 2492, 2493, 2494, 2495, 2496, 2497, 2498, 2499, 2500, 2501, 2502, 2503, 2504, 2505, 2506, 2507, 2508, 2509, 2510, 2511, 2512, 2513, 2514, 2515, 2516, 2517, 2518, 2519, 2520, 2521, 2522, 2523, 2524, 2525, 2526, 2527, 2528, 2529, 2530, 2531, 2532, 2533, 2534, 2535, 2536, 2537, 2538, 2539, 2540, 2541, 2542, 2543, 2544, 2545, 2546, 2547, 2548, 2549, 2550, 2551, 2552, 2553, 2554, 2555, 2556, 2557, 2558, 2559, 2560, 2561, 2562, 2563, 2564, 2565, 2566, 2567, 2568, 2569, 2570, 2571, 2572, 2573, 2574, 2575, 2576, 2577, 2578, 2579, 2580, 2581, 2582, 2583, 2584, 2585, 2586, 2587, 2588, 2589, 2590, 2591, 2592, 2593, 2594, 2595, 2596, 2597, 2598, 2599, 2600, 2601, 2602, 2603, 2604, 2605, 2606, 2607, 2608, 2609, 2610, 2611, 2612, 2613, 2614, 2615, 2616, 2617, 2618, 2619, 2620, 2621, 2622, 2623, 2624, 2625, 2626, 2627, 2628, 2629, 2630, 2631, 2632, 2633, 2634, 2635, 2636, 2637, 2638, 2639, 2640, 2641, 2642, 2643, 2644, 2645, 2646, 2647, 2648, 2649, 2650, 2651, 2652, 2653, 2654, 2655, 2656, 2657, 2658, 2659, 2660, 2661, 2662, 2663, 2664, 2665, 2666, 2667, 2668, 2669, 2670, 2671, 2672, 2673, 2674, 2675, 2676, 2677, 2678, 2679, 26

(2) 人工土の練り返し効果

1 目的

一般に自然の土、特に粘質土では練り返しによる強度の低下が生ずる。本実験は土壌槽実験の實際に鑑み、人工土にも自然土壌と同様に、練り返しに帰因する性質変化があるのではないかと、この想定の下に行なわれたものである。

いま、人工土の持つある強さ Q を次式で表わすものとする。

$$Q = F(S, T, D, A, H, \dots) \dots\dots\dots (3-38)$$

ここで、

- F ; 未知関数
- S ; 人工土の組成
- T ; 温度および湿度
- D ; 密度
- A ; 経過時間
- H ; 履歴(練り返しを含む)

Q に関係する因子として筆者の考えついたものを列挙したが、この他にも Q の関係因子はあるであろう。本実験ではそれら因子のうち、 H ; 履歴の項に含ませた練り返しの Q に及ぼす効果を調べようとした訳である。

Q として、①せん断試験による特性値 τ_c , c , ϕ および②ユニオンおよびプレート貫入抵抗を採用した。

2 方法

(1) 人工土組成

前節の結果に基づき、人工土の組成を次のように決定した。

a) 砂；よく乾燥しており、夾雑物の少ない砂を天然の河川砂や海浜砂に求めることは難しい。乾燥・篩別の作業労力と時間を節約する莫から鑄物砂に着目し、ドライ・モールド・サンド（淡路硅砂（株）製）を用いた。この砂は、石英を主成分とし0.3 mm から 0.9 mm の直径を持つ粒子が95%を占め、平均粒径 0.5 mm の粒度の揃った組成を持ち、含水比は0.19%であった。

b) 粘土；ベントナイト（豊順（株）製）を用いた。

c) オイル；粘質土に相当する人工土とも調製しうる必要のあることから、シリンダ・オイル 90W（日東（株）製）を用いた。

砂、ベントナイトの配合比は1：1とし、両者の混合物をもとに種々の含油率を持つ人工土サンプルを調製し、その中から前の実験結果を参考にして、砂質土に近い感触を示す人工土 A、重粘質土壌に近似している人工土 C およびその中間の性質を示す人工土 B の3種類を本実験に用いることにした（表3-37）。

表 3-37, 供試人工土

人工土	含油率 (%)	練り返し時間 (分)
A	9.91	5, 10, 25
B	16.12	4, 9, 14, 19, 29
C	20.00	3, 8, 13

(2) 人工土の調製方法

前の実験と異なり、多量の人工土を調製する必要があることおよび一定操作により調製しなければ本実験の主眼である練り返しによる効果を明らかにすることができないという理由により、図3-28に示す人工土調製装置を製作した。

鑄物砂とベントナイトの等量を攪拌槽に入れ、1分間混合した後、各含油率に相当する量のシリンダ・オイルを注入し、所

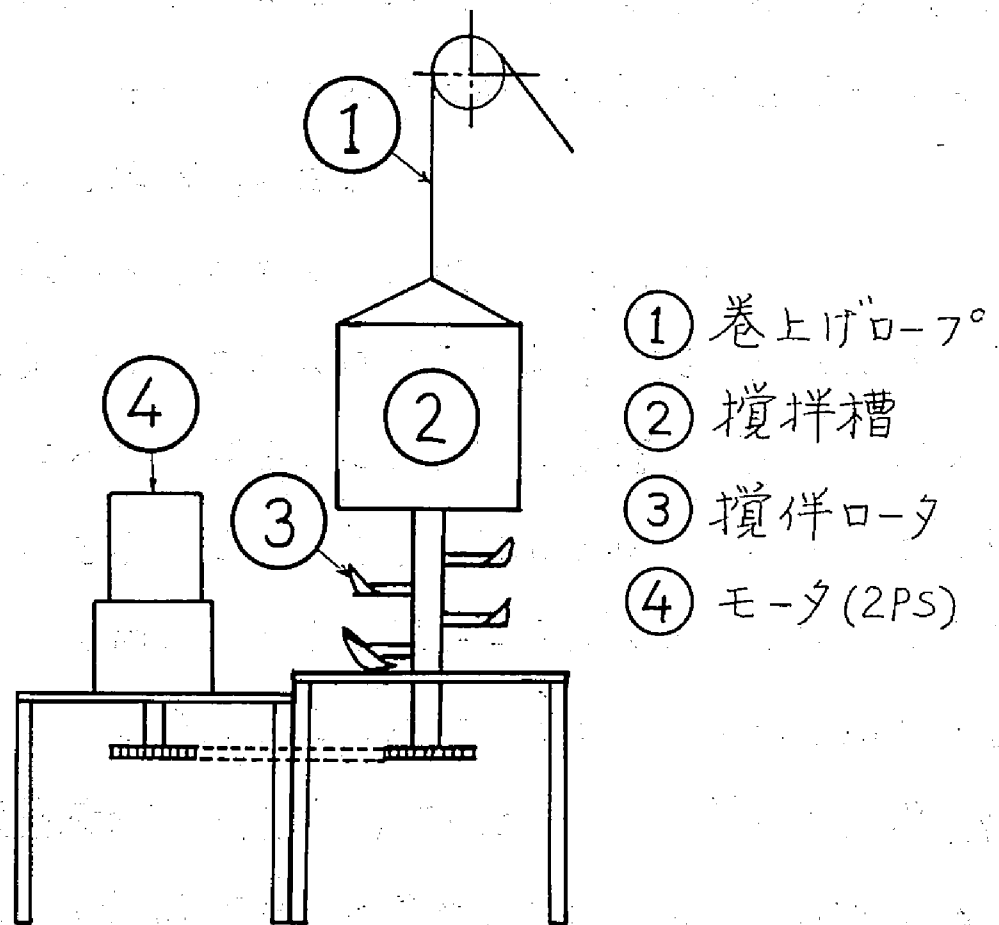


図3-28, 人工土調製装置

定の時間、練り返しを行なった。なお、練り返し時間の設定は観察と感触により人工土に性質変化が生じたのではないかと思われる時点を以って決定した。攪拌ロータは 114 rpm の一定回転速度とし、練り返しの尺度としては、その練り返し時間によって表わすことにした (表 3-37)。

(3) せん断試験

前章において既述したため省略する。ただし、同一人工土のサンプルについて、2 回の練り返し試験を行なった。

(4) 貫入抵抗実験

実験に供試する人工土の準備操作にはできる限り人為的操作を含まないことが要求されるため、以下に記述する二、三の装置を製作する必要があった。

i) 土壌槽への人工土の充填および締め固め

調製直後の人工土には温度の上昇が認められたが、室温と同温度になるまで放熱させた後、土壌槽 (木製、 $300^{\square} \times 450^H$ mm) への充填をした。充填に際しては、円錐台形状の鋼板製のじょうごを用い、できる限り均一に人工土を詰めるように注意を払った。充填後、土壌槽中の人工土の表面を均平にし、その上に重錘載荷板 (木製、 $298^{\square} \times 15^H$ mm) を置いた。円盤状の重錘 (28 kg) を載荷板中心に載せ、図 3-29 に示す締め固め装置により強制締め固めを行なった。この装置は、土壌槽に振動を与えることにより、槽中の人工土の締め固めを行なうもので、

均一な状態をうるために土壌槽収納箱の各側面に支持ローラを設け、主軸受とともに上下振動を垂直方向に保つようになっている。加振モータは補助的役割を持たせたものであり、主たる締め固め効果は土壌槽に与えた上下方向の振動（振巾約10mm）によるものであった。

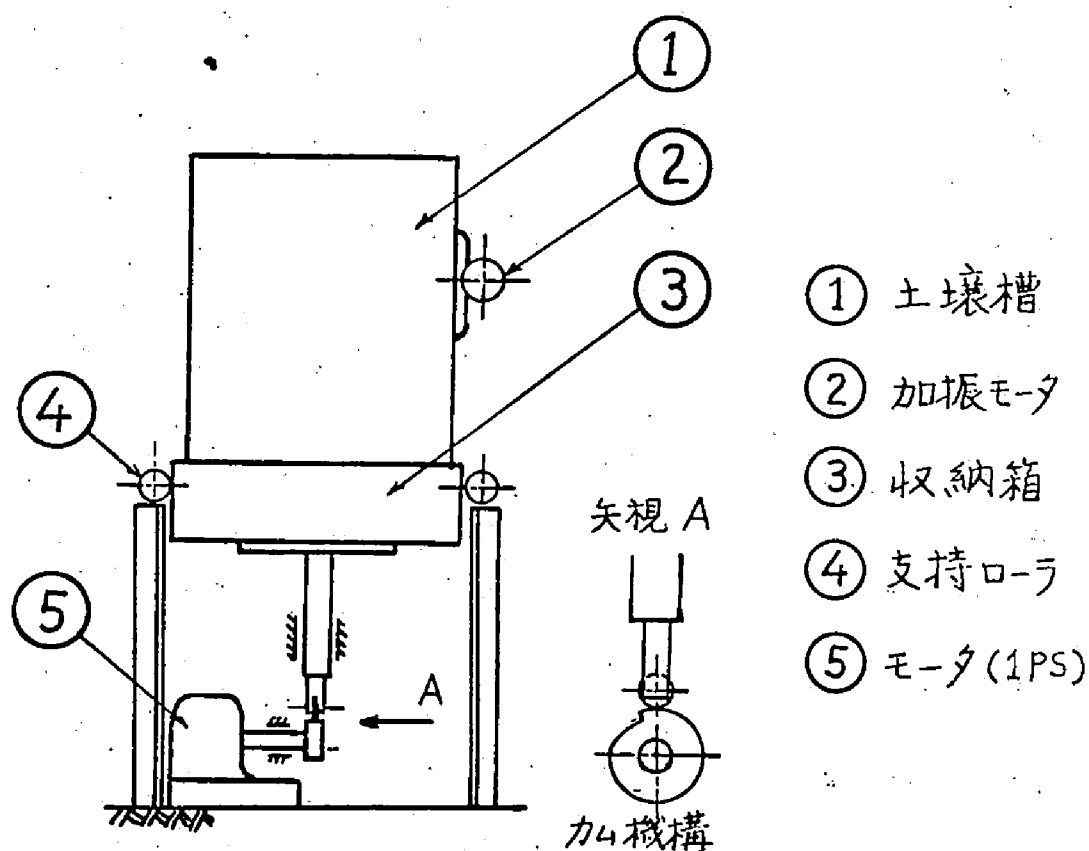


図3-29, 人工土締め固め装置

この上下方向の振動数と人工土密度の関係を調べた結果（図3-30），振動数50回を越えると締め固め効果が低下することがわかったため，本実験では特に断わらない限り，どの人工土にも50回の上下方向の振動を与えることにした。なお，ここで人工土密度とは，土壌槽中の人工土の深さを4点測定し，その平均値に基づいて人工土体積を求め，重量を除いた値をいう。

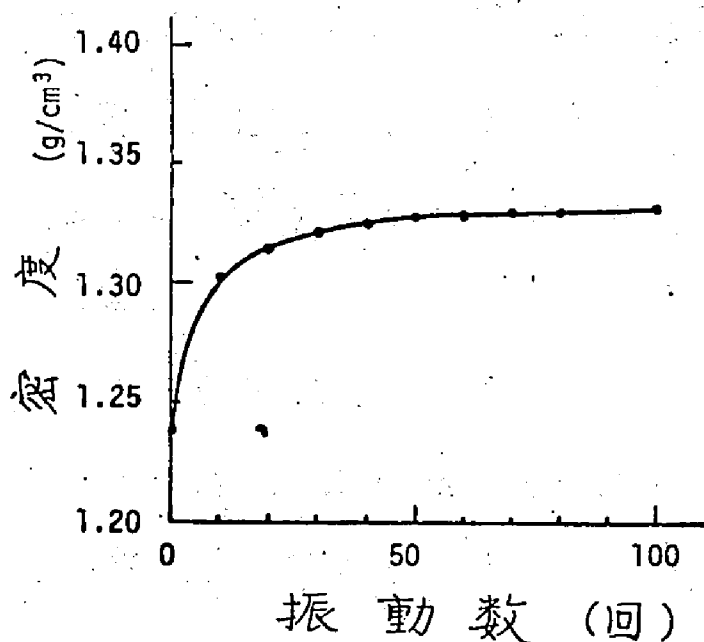


図 3-30, 上下方向振動数と人工土密度
(人工土 A の場合)

ii) 貫入抵抗および貫入深さの測定

円錐体貫入体 (コーン, 頂角 30° , 底面積 3.2 cm^2) および
 矩形板貫入体 (プレート, $100 \times 25 \text{ mm}$, 厚さ 10 mm) の貫入抵抗
 を測定した。油圧シリンダ (ストローク, 300 mm) のピスト
 ン棒先端に抵抗測定用のストレイン・ゲージ利用による圧縮力計
 を設け, 更にその下方に貫入棒を取り付け, 貫入体とその先端
 に固定した。貫入速度は 7 mm/sec と一定にし, 貫入深さは差
 動トランスを利用した。

iii) 実験条件

同一の人工土に対して 2 回の繰り返し実験を行ない,
 室温は $24 \pm 2^\circ \text{C}$ にコントロールした。

3 結果

1) セン断特性に及ぼす練り返しの効果

セン断特性値として、セン断抵抗 τ 、粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ 中に注目し、練り返しの効果を調べた結果を要約すれば次の通りである。

i) セン断抵抗 τ への効果

人工土A, B, Cについて練り返し時間と垂直圧力を因子として分散分析をすると、表3-38に示す通りである。垂直圧力は当然 τ に対して大きな影響を持つが、練り返し効果も明らかにあることがどの人工土についても言える。また、人工土A, Cでは交互作用も危険率1%で有意であった。

母平均推定をすると、人工土Aでは練り返し時間10分と25分ではその差が有意とは認められず、人工土Bでは14分と19分の母平均推定値の差に有意性が認められなかった。人工土Cについては、明白なことは言えない。

ii) 粘着力 c および内部摩擦角 ϕ への効果

表3-39に c , ϕ 値を示す。表からもうかがい知ることができるよう、 c , ϕ への練り返し効果を分散分析により調べてみると、人工土A, Bについては ϕ 、人工土Cについては c の値について、練り返しの効果は見られないことが判明した。

以上を総括すると、人工土のセン断強さ τ については練り返しの影響が大きく、したがって実験前に予測した通り、人工

表 3-38, 分散分析表

K; 練り返し時間, P; 垂直圧力

人工土	SV	SS	DF	MS	F	F(0.05)	F(0.01)
A	K	0.23	2	0.113	6.35*	3.68	6.36
	p	13.24	4	3.309	186.5**	3.06	4.89
	K x p	0.65	8	0.082	4.61**	2.64	4.00
	誤差	0.27	15	0.018			
	計	14.38	29				
B	K	1.41	4	0.352	28.0**	2.76	4.18
	p	28.19	4	7.048	561.5**	2.76	4.18
	K x p	0.26	16	0.016	1.29	2.06	2.81
	誤差	0.31	25	0.013			
	計	30.17	49				
C	K	0.19	2	0.095	66.8**	3.68	6.36
	p	1.45	4	0.363	254.7**	3.06	4.89
	K x p	0.11	8	0.014	9.5**	2.64	4.00
	誤差	0.02	15	0.0014			
	計	1.77	29				

表 3-39, 人工土の c, ϕ 値

人工土	練り返し時間	ϕ	c
A	5 ^(分)	29.3 ^(°)	0.3650 (kg/cm ²)
	10	38.4	-0.0104
	25	38.3	0.0696
B	4	38.9	0.0428
	9	36.2	0.1918
	14	38.5	0.3347
	19	40.7	0.2140
	29	40.3	0.3567
C	3	16.6	0.7397
	8	8.8	0.8392
	13	14.6	0.7242

土を取扱う上で練り返しということを考慮する必要があることが指摘できる。しかし、更に詳しく、中値について見ると、余りはっきりとした事は言えないようである。とくに、人工土CはそのCの値が大きく、丁度自然土壌の粘質土に相当するが、その測定結果も同じようにかなりのばらつきを示している事が興味深い。直接せん断試験の持つ欠点も当然含まれて、このようなばらつきを示したものであろうが、データ数の不足も反省させられるところである。

2) 貫入抵抗に及ぼす練り返しの効果

コーンおよびプレートの貫入抵抗から見た練り返しの効果を段階を追って調べる。

i) 人工土の再現性

人工土に期待する種々の性質の中の一つは、再現性ということである。同じ状態の人工土を再現（または、再生と呼ぶ方が適切であろう）できることが、土壌槽実験では要求される。ここでは、その再現性を二つの尺度で検討する。

a) 充填密度から見た人工土の再現性

密度は、土の強さに大きな影響を持つ因子の中でも、代表的なものである。できる限り人為的操作を取り除いた方法で充填・締め固め操作を施し、貫入抵抗の実験に供試された各人工土の槽中の平均密度は表3-40に示す通りである。

同一操作により準備された各人工土は、いずれの場合に

いても2回ずつであり、その密度を比較して見ると非常に近似した値を示している。含油率が高い人工土ほど密度の差が大きくなっているが、これは流動性の欠如とともに練り返しにより小さな球状の土塊が形成される現象がその原因を説明している。

表 3-40, 供試人工土の密度

人工土	練り返し 時間 (分)	密 度 (kg/cm ³)	
		コーン	プレート
A	5	1.292	1.305
		1.292	1.304
	10	1.315	1.324
		1.318	1.324
	25	1.324	1.322
		1.322	1.326
B	4	1.215	1.214
		1.217	1.215
	9	1.210	1.194
		1.203	1.200
	14	1.179	1.181
		1.172	1.175
	19	1.190	1.170
		1.183	1.171
	29	1.197	1.180
		1.184	1.177
C	3	1.355	1.307
		1.309	1.311
	8	1.321	1.290
		1.305	1.281
	13	1.249	1.214
		1.234	1.210

b) 貫入抵抗から見た人工土の再現性

貫入深さ 5, 10, 15, 20 cm におけるコーンとプレート
の各2回の繰り返し測定による貫入抵抗値を表3-41に示す。表
中の()内に示した値は2回の繰り返し実験で得られた各抵抗
値の差の両者の平均値に対する百分率であり、貫入抵抗から見
た人工土の再現性を示す一つの指標と考えることができる。

表を概観すると、再現性は表層土ほど低く、繰り返しや含
油率による一定の傾向は明らかではない。また、コーンとプレ
ートにつき各2回、計4回一定操作の下に各人工土の状態が準
備されたのであるが、貫入抵抗から見る限りその値の変動はコ
ーンの方が大きい場合が多いと言える。

ii) 貫入抵抗と繰り返し時間

各2回の実験における貫入抵抗の平均値と繰り返し時
間との関係は図3-31の通りである。すなわち、繰り返しによ
って抵抗は変化していることがわかる。しかし、これは普通の土
壌槽実験における碎土・均平・鎮圧といった一連の画一的な準
備操作の結果、人工土に生ずる性質の変化を捉えたものである
と考えるべきである。何故ならば、画一的操作の結果として生
ずる人工土の密度は、たとえば表3-40に示したように必ずしも
同一にはならない。そして、その密度が人工土の力学的特性に
大きく関係しているとすれば、図3-31に示される抵抗の変動は
純粋に繰り返しのみの効果を反映しているものではないからで

表 3-41, 貫入抵抗測定結果 (単位, kg)

人工土	繰返し 時間, (分)	コ ー ス				プ レ ー ト			
		5 cm	10 cm	15 cm	20 cm	5 cm	10 cm	15 cm	20 cm
A	5	4.97 (7.3)	10.78 (7.5)	13.81 (5.9)	15.55 (4.8)	42.61 (15.6)	76.45 (4.3)	102.5 (0.2)	121.5 (1.5)
	10	4.64 (4.4)	11.73 (7.1)	15.71 (4.0)	17.81 (3.2)	32.17 (0.2)	70.43 (0.8)	97.16 (0.2)	119.2 (2.7)
	25	3.31 (8.8)	9.22 (5.6)	14.55 (3.1)	19.55 (3.1)	25.56 (13.0)	53.61 (0.0)	83.16 (4.8)	120.9 (1.5)
B	4	7.13 (19.8)	11.61 (1.0)	13.68 (4.0)	14.41 (3.2)	55.60 (0.2)	77.18 (0.8)	90.23 (0.2)	102.8 (2.7)
	9	7.39 (18.2)	12.32 (2.3)	14.44 (5.1)	16.02 (1.0)	58.66 (6.0)	82.21 (4.0)	96.05 (5.3)	110.5 (3.0)
	14	6.79 (3.4)	11.92 (3.5)	13.72 (1.5)	14.76 (1.9)	65.90 (1.9)	91.00 (0.9)	108.4 (3.6)	122.4 (6.2)
	19	8.43 (1.5)	13.37 (0.7)	15.56 (0.8)	17.59 (2.8)	67.47 (4.2)	92.63 (2.0)	109.4 (2.3)	125.5 (0.2)
	29	8.30 (12.3)	13.47 (6.8)	15.43 (1.5)	18.89 (3.4)	70.43 (1.0)	94.56 (1.4)	112.0 (2.4)	125.8 (3.1)
C	3	12.85 (10.2)	16.15 (5.0)	16.29 (1.7)	17.82 (1.6)	78.16 (12.1)	105.3 (2.9)	117.9 (0.0)	127.3 (3.5)
	8	11.58 (7.4)	19.33 (22.5)	17.15 (4.0)	18.72 (1.1)	68.32 (3.6)	94.90 (3.0)	104.4 (2.5)	110.0 (3.7)
	13	9.00 (21.5)	15.02 (3.5)	15.25 (5.7)	16.94 (1.1)	65.08 (2.4)	91.27 (1.3)	102.2 (1.0)	108.6 (0.3)

() 内の値は, 2回の測定値の平均に対するその差の割合 (%)。

ある。そこで、貫入抵抗と人工土密度との関係を明らかにするための追加実験を行なった。

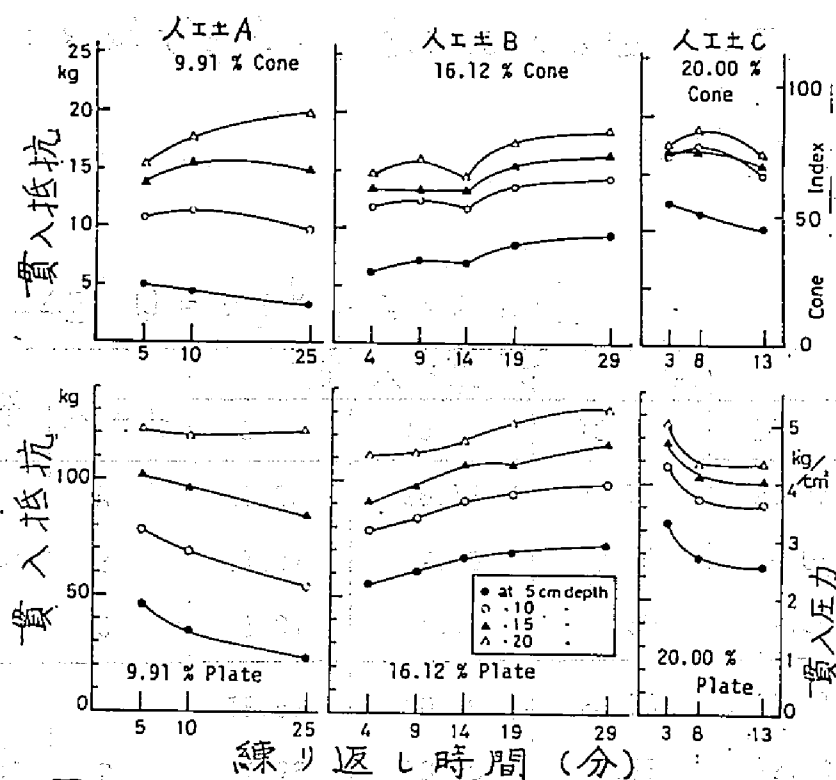


図 3-31, 貫入抵抗と練り返し時間

iii) 貫入抵抗と密度との関係

人工土 A, B, C の各最終練り返し段階の土について、貫入抵抗と密度の関係をコーンとプレートについて実験した。

人工土を土壌槽中に充填し、表土と均平にする操作のみを施した密度最小の状態から、締め固め装置によって 100 回の上下方向の振動を与えた密度最大の状態までの種々の密度を持つ人工土について貫入抵抗を測定した。

その結果、コーンとプレートについて、各貫入深における抵抗と密度との関係は図3-32に示すように指数曲線となり、

$Q = a \rho^b$: Q ; 貫入抵抗, ρ ; 人工土密度, a, b ; 定数で表わすことができる。表3-42に b 値を示す。

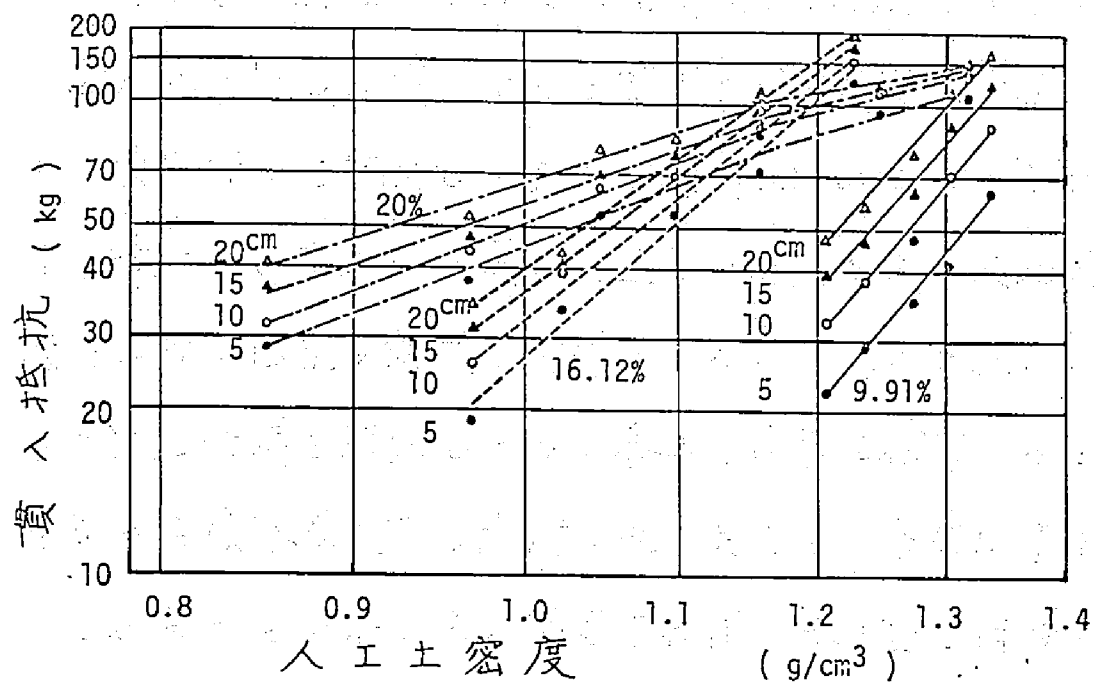
表3-42, $Q = a \rho^b$ における b 値

貫入体	人工土	貫入深さ (cm)			
		5	10	15	20
コーン	A	26.00	28.15	30.18	26.37
	B	11.97	9.35	8.05	8.02
	C	5.91	4.90	4.50	4.65
プレート	A	18.58	20.59	20.53	20.11
	B	14.75	13.36	12.83	12.14
	C	5.75	5.77	5.29	4.68

iv) 同一密度における貫入抵抗と繰り返し時間

貫入抵抗を人工土の持つある性質の指標として繰り返し効果を更に明らかにするためには、人工土の同一密度という条件下における貫入抵抗を以って比較検討すべきである。しかし、本実験では表3-40に見るような同一の含油率の人工土間に密度の差が存在する。

(a) コーンの場合



(b) フレートの場合

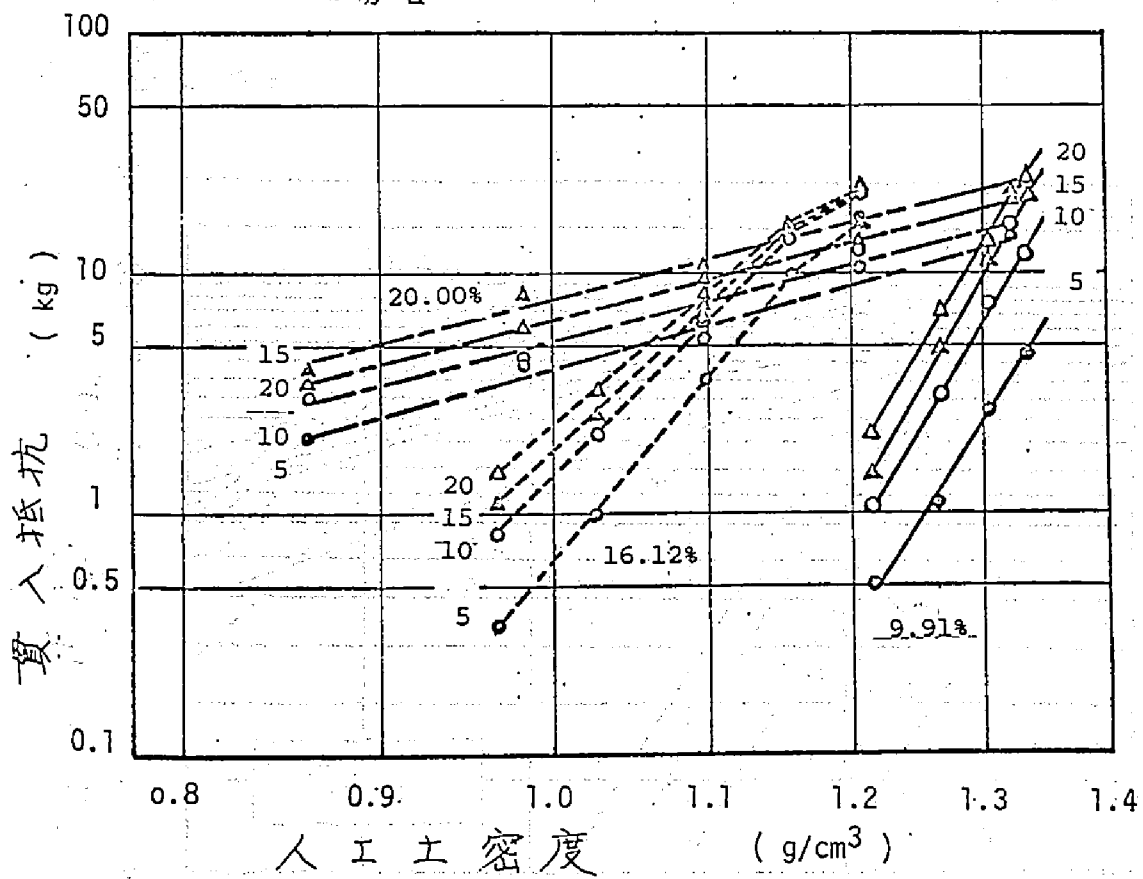


図 3-32, 貫入抵抗と人工土密度の関係

そこで、前項で求めた抵抗と密度の関係を示す図上に、各回の繰り返し実験の平均密度および平均貫入抵抗をプロットし、該当部分を拡大して見ると図3-33, (a), (b) のようになる。図中の線は、いずれも前項に記述した各人工土の最終繰り返し段階における抵抗と密度の関係である。()内に記入されている繰り返し時間を対照しつつ、各点の位置を検討すると当然のことながら最終繰り返し段階に近い点ほど各対応する線に近接していることがわかる。換言すれば、繰り返し時間が短い点ほど線から離れている。これは、明らかに繰り返しの影響によると言える。

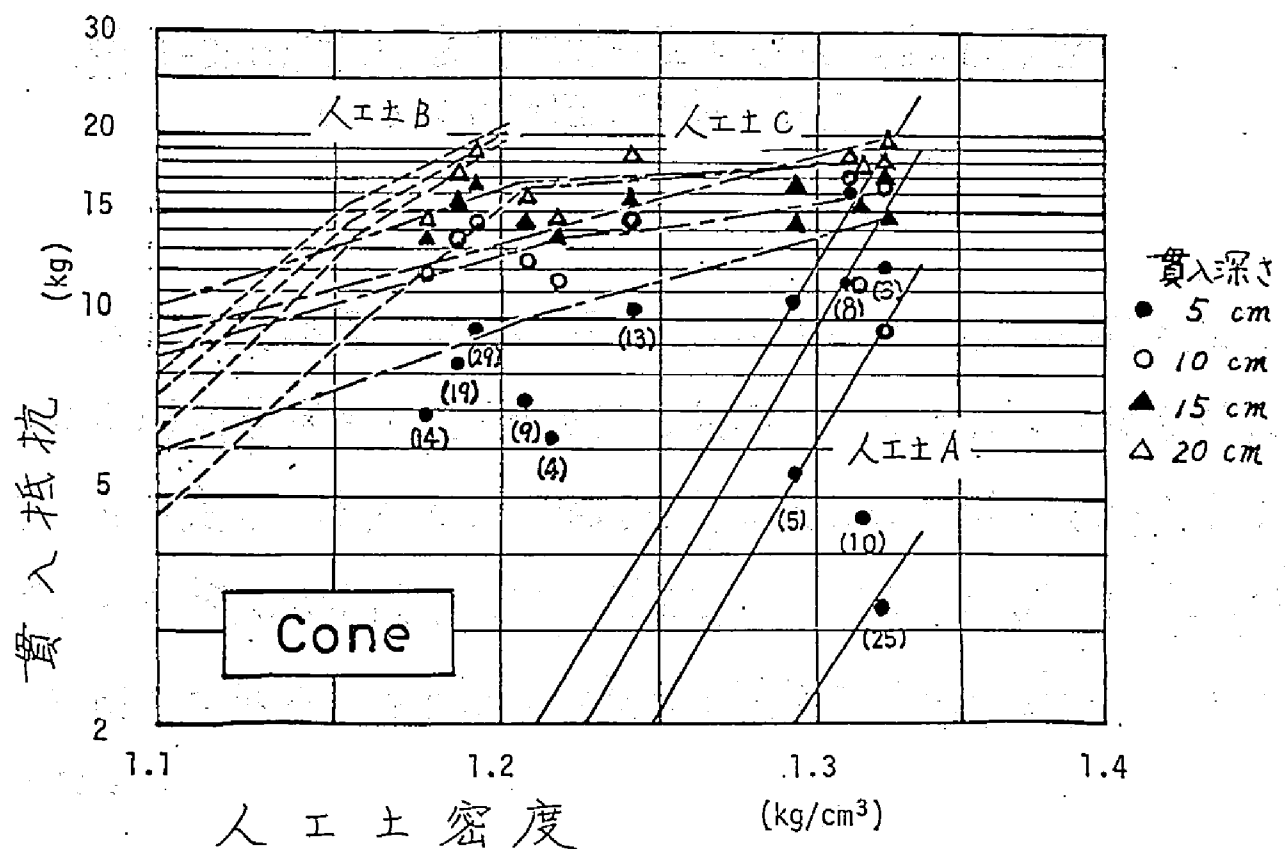


図3-33, (a) 貫入抵抗測定値と密度・抵抗線図
 () は繰り返し時間を示す。

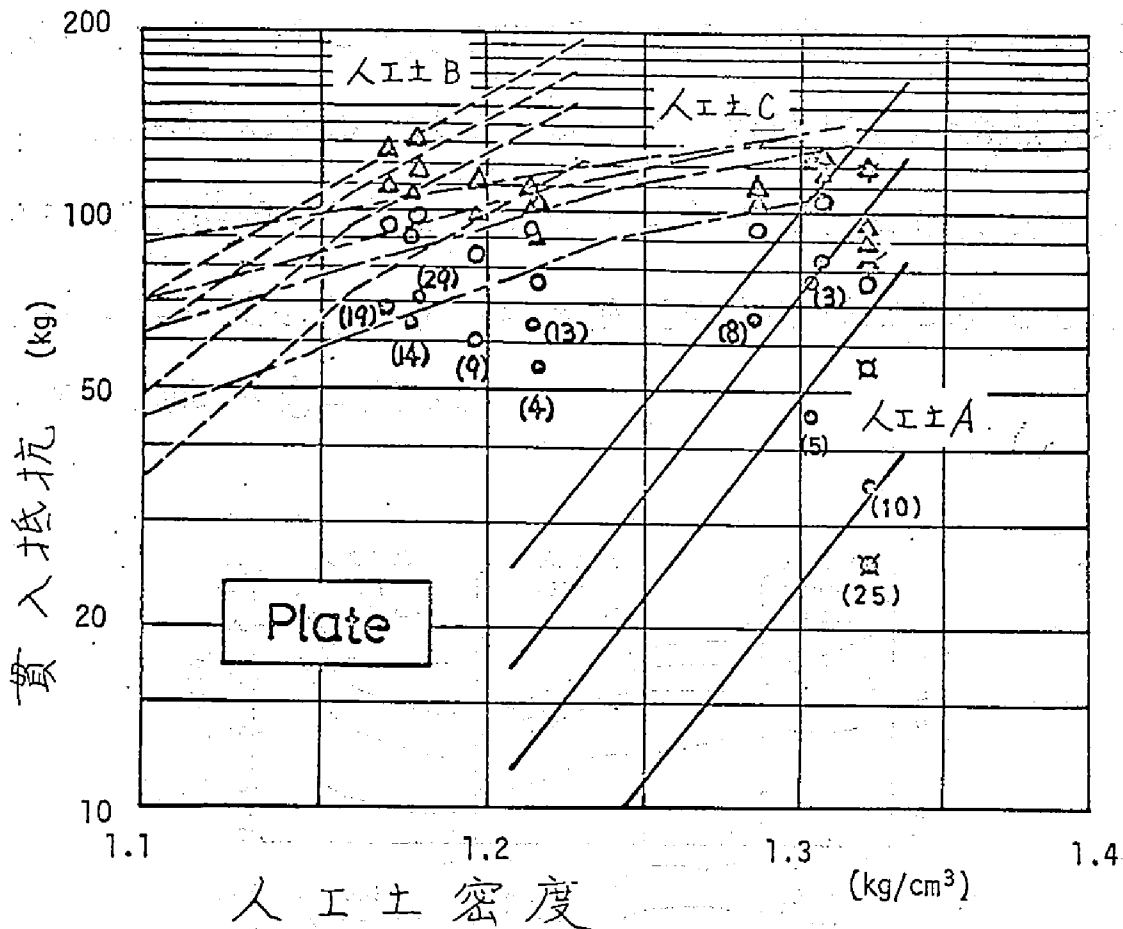


図 3-33(b), 貫入抵抗測定値と密度・抵抗線図
() は練り返し時間を示す。

いま、最終練り返し段階の人工土における貫入抵抗の密度による増減率がその他の練り返し段階の人工土についても成立すると仮定し、各人工土の平均密度の人工土において得られるであろう貫入抵抗値（以後、修正貫入抵抗値と呼ぶ）を $Q = a\rho^b$ を利用して求め、練り返し時間との関係を見ると図3-34のようになる。

人工土Aでは、コーン、プレートとも練り返し初期には貫入抵抗は著しく減少するが、最終練り返し段階では抵抗変化は

微小となり，ほぼ一定の抵抗を示す。人工土Bでは，19分付近までは抵抗の増加が顕著であるが，以後次第に曲線は平坦となり減少の傾向すら示している。一方，人工土Cはコーン抵抗については一定せず，プレート抵抗は8分付近を谷として以後増加する傾向が見られる。

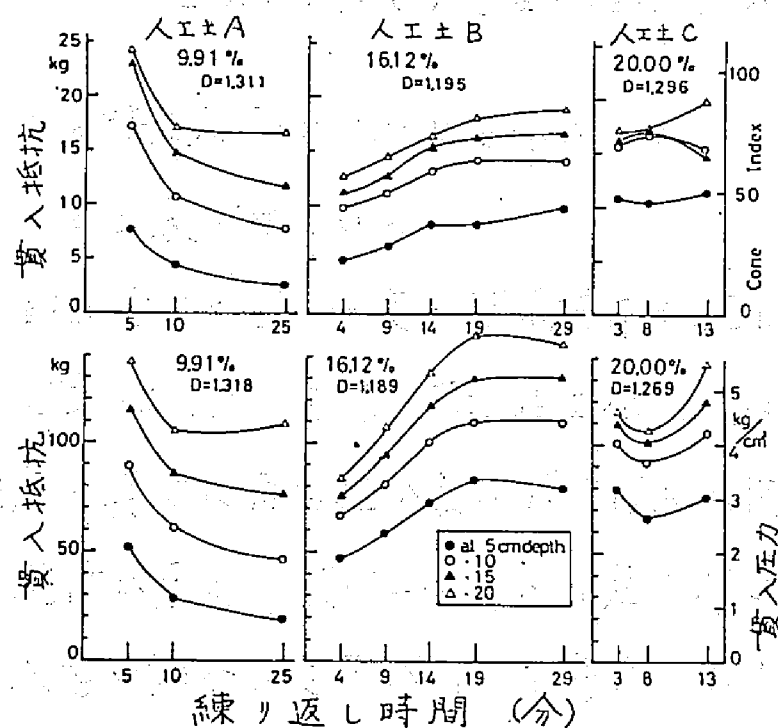


図 3-34, 練り返し時間と修正貫入抵抗
(上段コーン, 下段プレート, Dは平均密度)

V) 練り返し効果

修正貫入抵抗値に基づき，分散分析により練り返し効果を調べた。各人工土について，貫入深さ別にその結果を示せば表3-43の通りである。人工土Cの表土層を除き，いずれも1%または5%の危険率で練り返しの効果が認められ，実験の繰

表 3-43, 分散分析結果

貫入深さ (cm) 人エ土	コ ー ン				プ レ ー ト			
	5	10	15	20	5	10	15	20
A	1*	5**	1	5	1	1	1	1
B	1	1	1	1	1	1	1	1
C	-	-	5	5	-	1	1	1

- 有意差が認められない。

* 危険率 5% で有意差が認められる。

** 危険率 1% で有意差が認められる。

り返しによる誤差変動がきわめて小さいことから、実験の再現性がよいことを裏付けている。

以上を総括すると、一定の準備操作を施した人エ土について、密度と貫入抵抗を指標に再現性を検討した結果、人エ土 A, B では密度の点では再現性が良いが、貫入抵抗から見ると表層土ほど再現性が悪く、数パーセントの差を問題とする実験では実験前に入念な調査の必要があると考えられる。人エ土 C については、再現性が悪いという結果を得た。

次に、人エ土には自然土壌と同様、練り返しの影響が明らかに認められた。データの乏しい人エ土 C については練り返しの影響があることは認めたものの、一定の傾向が得られなかった。しかし、人エ土 A, B では、ある時間練り返しを行えば貫入抵抗という尺度に関しては、ほぼ一定値になることが明らかにされた。その他、Cone Index では十分自然土壌を模擬しうる強さを人エ土が持っていることがわかり、砂質土から粘質土に

至る状態を作り出せるものとする。

(3) 人工土に関する実験結果の要約

入手が容易で、比較的安価な砂・ベントナイト・シリンドグオイル90Wという組合せが、その含油率を度えることにより、砂質土から粘質土までの種々の土を十分模擬しうる強度特性を保障することが明らかになった。シリンドグオイル90Wはエチレングリコール(Ethylene Glycol)の欠点である吸湿性はない。

以上の点から、本実験で調製した人工土は、これまでに作られた人工土の性質とくらべてみると、十分優れたものであると言えよう。

また、練り返しによる人工土の性質変化は、せん断強さや土質常数の結果と貫入抵抗を尺度とした場合の結果とは必ずしも合致しなかったが、練り返しの影響があることは明白であった。人工土を調製、使用して実験をする場合には、練り返しの影響を念頭に入れて、十分に人工土の状態をチェックする必要がある。因に、この実験に着手するに先立って、人工土に関する文献を調べたが、人工土の組成は記してあっても、その具体的な調製方法を記述しているものは少なかった。

人工土に関しては、今後更に多くの研究が必要である。練り返しの影響は勿論、本実験が最初のものであるが、経過時間(Aging)、温度などによる性質変化については未だ取り上げられ

B. 乾燥砂と人工土を利用したロータリの相似性実験

1. 目的

ロータリ耕うんトルクあるいは耕うんエネルギーを特性値とし、ロータリ耕うん刃に関する相似条件を明らかにすることを目的とする。具体的には、単純けん引作用の排土板、トラックシューの場合には、乾燥砂を対象とする系では、相似条件として実際には砂の性質因子を含めなくても相似性が成立したが、同様の事が回転切削作用を持つロータリの場合にも見い出せるのかどうかを検討することおよび人工土を対象とする系においては、関係因子としていかなる性質を選定し相似条件とすべきか、の二点が中心となる。

耕うんトルクまたは耕うんエネルギーに係る機械側の因子は下記のように多く、交互作用もあると考えられる。

1. 動力伝達方式 (センタ・ドライブ, サイド・ドライブ)
2. 耕うん刃取付方式 (1本刃, 複数刃)
3. 耕うん刃配列方式
4. 耕うん刃形状
5. 耕うん刃回転方向 (Up cut 方式, Down cut 方式)
6. 耕うん刃の寸法
7. 耕うん条件

7.1) 耕うん軸回転速度

7.2) 耕うん速度

7.3) 耕深

7.4) 耕中

したがって、本実験では、上記の因子中、1)から5)までの因子と7.4) 耕中を一定に保ち、その他の耕うん条件をパラメータとして、6) 耕うん刃の寸法が耕うんトルクあるいは耕うんエネルギーに及ぼす影響を調べるとともに、ロータリ作業機を通じて、回転切削作用を持つ土-機械系の相似性について検討を行なった。

2 相似条件の誘導

土-ロータリ系に関する変数を表3-44に示す。表中のロータリ耕うんトルク以外に、一般には三方向の耕うん抵抗分

表3-44, 土-ロータリ系の関係因子

因子名	記号	次元
耕うんトルク	T	M L ² T ⁻²
刃回転半径	R	L
耕 中	B	L
耕 深	Z	L
耕うん軸回転速度	N	T ⁻¹
耕うん速度	v	L T ⁻¹
密 度	ρ	M L ⁻³
重力加速度	g	L T ⁻²
土の性質	α_i	M ^a L ^b T ^c
"	β_i	M ^{a'} L ^{b'} T ^{c'}

i は 1, 2, ... の値をとる。

力およびモーメントが従属変数として挙げられるが、後述するように本実験では良質の分力およびモーメントが得られなかったため、耕うんトルクのみを掲げた。

土の因子の選定方法により、 a, b, c の各値は変わり、その結果として、実物・モデルに与える関係、すなわち、相似条件は異なる。以下、次元解析に基づいて土ロータリ系における相似条件を求める。

(1) 土の因子を含まない場合

土の密度以外には土の因子を含まない場合、つまり、 $a = b = c = 0$ の時、耕うんトルクと各因子との関係は次式で示されるものとする。

$$T = f_1(R, B, Z, N, v, \rho, g) \dots\dots\dots (3-39)$$

無次元量で上式を書きかえると、

$$\frac{T}{\rho g R^4} = F_1\left(\frac{B}{R}, \frac{Z}{R}, \frac{v^2}{gR}, N\sqrt{\frac{R}{g}}\right) \dots\dots\dots (3-40)$$

という予報式が得られ、相似条件は次の通りである。

$$\left. \begin{aligned} \frac{B}{R} &= \frac{B_m}{R_m} \\ \frac{Z}{R} &= \frac{Z_m}{R_m} \\ \frac{v^2}{gR} &= \frac{v_m^2}{g_m R_m} \\ N\sqrt{\frac{R}{g}} &= N_m\sqrt{\frac{R_m}{g_m}} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3-41)$$

(3-41)式で示される相似条件を満足する実物・モデル両系間には、次の予報式が成立する。

$$\frac{T}{\rho g R^4} = \frac{T_m}{\rho_m g_m R_m^4} \quad \dots\dots\dots (3-42)$$

同一土壌において両系をテストする場合、 $\rho = \rho_m$ であり、 $g = g_m$ としてよいから、モデルの耕うんトルク T_m は次式で表わされる。

$$T_m = \frac{1}{n^4} T \quad \dots\dots\dots (3-43)$$

次に、関係因子から重力加速度を除去した場合について、予報式と相似条件と求めると以下の通りである。

$$T = f_1(R, B, Z, N, v, \rho) \quad \dots\dots\dots (3-44)$$

$$\frac{T}{\rho v^2 R^3} = F_1\left(\frac{B}{R}, \frac{Z}{R}, \frac{RN}{v}\right) \quad \dots\dots\dots (3-45)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{B}{R} &= \frac{B_m}{R_m} \\ \frac{Z}{R} &= \frac{Z_m}{R_m} \\ \frac{RN}{v} &= \frac{R_m N_m}{v_m} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3-46)$$

(3-41)式と(3-46)式の相似条件と比較すると、 v 、 N に関して、重力加速度 g の有無による差異がある。前者では、モデルに与えるべき耕うん速度、耕うん軸回転速度は、

$$v_m = \frac{v}{\sqrt{n}} \quad \dots\dots\dots (3-47)$$

$$N_m = \sqrt{n} \cdot N \quad \dots\dots\dots (3-48)$$

で示されるのに対し、後者では、

$$\frac{N_m}{v_m} = n \frac{N}{v} \quad \dots\dots\dots (3-49)$$

となり、 v と N との比の関係を条件としている。したがって、 v_m または N_m を適当に定めても(3-49)式を満足していれば

良く, v_m, N_m が実物の v, N から一義的に決定されるとは異なっている。しかしながら, (3-47), (3-48) 両式を (3-49) 式に代入すれば満足することから, 重力加速度を含む場合の相似条件は重力加速度を含まない場合の相似条件の特殊例として包含されると考えることができる。

(3-46) 式の相似条件を満足する実物・モデル両系間には次の予報式が成立する。

$$\frac{T}{\rho v^2 R^3} = \frac{T_m}{\rho_m v_m^2 R_m^3} \quad \dots\dots\dots (3-50)$$

同一土壌を両系に用い, (3-47), (3-48) 式で示される条件下では, モデルの耕うんトルク T_m は重力加速度を含めた場合と同様に次式で表わされる。

$$T_m = \frac{1}{n^4} T \quad \dots\dots\dots (3-51)$$

しかし, v, N が (3-49) 式で示される一般の場合には, T_m を縮尺比 n のみの関数として表わすことはできない。

(2) 土質常数 c , ϕ を土の因子とする場合

土の粘着力 c については, $a=1, b=-1, c=-2$, 内部摩擦角 ϕ については, $a'=b'=c'=0$ となる。耕うんトルクを次式で示すものとする。

$$T = f_2(R, B, Z, N, v, \rho, c, \phi, g) \quad \dots\dots\dots (3-52)$$

無次元化すると,

$$\frac{T}{c R^3} = F_2\left(\frac{B}{R}, \frac{Z}{R}, RN\sqrt{\frac{\rho}{c}}, v\sqrt{\frac{\rho}{c}}, \phi, \frac{\rho g R}{c}\right) \dots\dots\dots (3-53)$$

相似条件は、

$$\left. \begin{aligned} \frac{B}{R} &= \frac{B_m}{R_m} \dots\dots\dots (3-54-1) \\ \frac{Z}{R} &= \frac{Z_m}{R_m} \dots\dots\dots (3-54-2) \\ RN\sqrt{\frac{\rho}{c}} &= R_m N_m \sqrt{\frac{\rho_m}{c_m}} \dots\dots\dots (3-54-3) \\ v\sqrt{\frac{\rho}{c}} &= v_m \sqrt{\frac{\rho_m}{c_m}} \dots\dots\dots (3-54-4) \\ \phi &= \phi_m \dots\dots\dots (3-54-5) \\ \frac{\rho R g}{c} &= \frac{\rho_m R_m g_m}{c_m} \dots\dots\dots (3-54-6) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3-54)$$

となる。このうち、(3-54-6)式より、

$$\frac{\rho_m}{c_m} = n \frac{\rho}{c} \dots\dots\dots (3-55)$$

が得られる。この関係式を(3-54-3)、(3-54-4)式に代入して導かれる次の両式、

$$N_m = \sqrt{n} \cdot N \dots\dots\dots (3-56)$$

$$v_m = \frac{v}{\sqrt{n}} \dots\dots\dots (3-57)$$

がモデルに与えるべき耕うん軸回転速度および耕うん速度である。しかし、(3-54-5)、(3-55)両式を満足するように土を準備することは、一般には不可能であるから、実物・モデルの両系を同一の土で実験する方法を採り、縮尺比 n をひずみ係数とする。

次に、前項と同様に、重力加速度を除去した場合について、相似条件を求める。

$$T = f'_2(R, B, Z, N, v, \rho, c, \phi) \dots\dots\dots (3-58)$$

$$\frac{T}{cR^3} = F'_2\left(\frac{B}{R}, \frac{Z}{R}, RN\sqrt{\frac{\rho}{c}}, v\sqrt{\frac{\rho}{c}}, \phi\right) \dots\dots\dots (3-59)$$

$$\frac{B}{R} = \frac{B_m}{R_m} \quad (3-60-1)$$

$$\frac{Z}{R} = \frac{Z_m}{R_m} \quad (3-60-2)$$

$$RN\sqrt{\frac{\rho}{c}} = R_m N_m \sqrt{\frac{\rho_m}{c_m}} \quad (3-60-3)$$

$$v\sqrt{\frac{\rho}{c}} = v_m \sqrt{\frac{\rho_m}{c_m}} \quad (3-60-4)$$

$$\phi = \phi_m \quad (3-60-5)$$

} (3-60)

上式で示される相似条件中，土の因子を含む無次元項では $\phi = \phi_m$ のみが制約条件であり，同一土壌を用いる場合には， $\rho = \rho_m$ ， $c = c_m$ ， $\phi = \phi_m$ であるから，(3-60-3)，(3-60-4) 両式から，

$$\frac{N}{v} = \frac{1}{n} \frac{N_m}{v_m} \dots\dots\dots (3-61)$$

をうる。重力加速度の有無による相似条件の比較は，前項で記したと同じことが言える。また，(3-62)式のトルクに関する予報式は， $\rho = \rho_m$ ， $\phi = \phi_m$ であつて $c = n \cdot c_m$ なる条件下で (3-63)式のモデルについての耕うんトルクを与えるが，そうした条件は一般の土壌では得られないと考えてよい。

$$\frac{T}{cR^3} = \frac{T_m}{c_m R_m^3} \dots\dots\dots (3-62)$$

$$T_m = \frac{1}{n^4} T \dots\dots\dots (3-63)$$

(3) 耕深 Z における貫入抵抗値を土の因子とする場合

実験〔1b〕, ひずみの取扱いの項において述べたように, 貫入抵抗試験の結果得られる貫入深さ-貫入抵抗曲線から, 実物およびモデルの各設定耕深に相当する貫入抵抗 Q_p (kg/cm^2)を求め, 当該の系に関する土の強さ因子とする。この場合, Q_p の次元は $M L^{-1} T^{-2}$ であるから, $a=1, b=-1, c=-2$ となる。

耕うんトルクを次式で示すものとする。

$$T = f_3(R, B, Z, N, v, \rho, Q) \quad \dots\dots\dots (3-64)$$

$$\frac{T}{Q_p R^3} = F\left(\frac{B}{R}, \frac{Z}{R}, NR\sqrt{\frac{\rho}{Q_p}}, v\sqrt{\frac{\rho}{Q_p}}\right) \quad \dots\dots\dots (3-65)$$

相似条件は,

$$\frac{B}{R} = \frac{B_m}{R_m} \quad \dots\dots (3-66-1)$$

$$\frac{Z}{R} = \frac{Z_m}{R_m} \quad \dots\dots (3-66-2)$$

$$NR\sqrt{\frac{\rho}{Q_p}} = N_m R_m \sqrt{\frac{\rho_m}{Q_{pm}}} \quad \dots\dots (3-66-3)$$

$$v\sqrt{\frac{\rho}{Q_p}} = v_m \sqrt{\frac{\rho_m}{Q_{pm}}} \quad \dots\dots (3-66-4)$$

$$\dots\dots\dots (3-66)$$

同一の土を実物・モデル両系に用いる時, (3-66-3), (3-66-4)

両式より,

$$N_m = n \sqrt{\frac{Q_{pm}}{Q_p}} N \quad \dots\dots\dots (3-67)$$

$$v_m = \sqrt{\frac{Q_{pm}}{Q_p}} v \quad \dots\dots\dots (3-68)$$

となり, モデルに与えるべき N_m, v_m の関係式が得られる。したがって, 実験に先立って貫入抵抗の測定を行ない, Q_{pm}, Q_p を求めればよいことがわかる。(3-66)式の相似条件を与える

ことができれば，次の予報式が成立する。

$$\frac{T}{Q_p R^3} = \frac{T_m}{Q_{pm} R_m^3} \quad \dots\dots\dots (3-69)$$

いま，乾燥砂において実物・モデルをテストする場合を考えてみると， $Q_p = n \cdot Q_{pm}$ なる関係があるから（実験〔1b〕，図3-9を参照のこと）， T_m は次式で予報される。

$$T_m = \frac{1}{n^4} T \quad \dots\dots\dots (3-70)$$

(4) 耕深 Z までの貫入抵抗積分値を土の因子とする場合

この土の因子についても既に説明済みであるから，ここでは省略する。貫入抵抗積分値 Q_A の次元は ML^{-2} であるから， $a=1$ ， $b=0$ ， $c=-2$ となる。耕うんトルクを次式で示すものとし，無次元化して相似条件を求めると以下の通りである。

$$T = f_4(R, B, Z, N, v, \rho, Q_A) \quad \dots\dots\dots (3-71)$$

$$\frac{T}{R^2 Q_A} = F_4\left(\frac{B}{R}, \frac{Z}{R}, NR \sqrt{\frac{\rho R}{Q_A}}, \frac{\rho R v^2}{Q_A}\right) \quad \dots\dots\dots (3-72)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{B}{R} &= \frac{B_m}{R_m} \\ \frac{Z}{R} &= \frac{Z_m}{R_m} \\ NR \sqrt{\frac{\rho R}{Q_A}} &= N_m R_m \sqrt{\frac{\rho_m R_m}{Q_{Am}}} \\ \frac{\rho R v^2}{Q_A} &= \frac{\rho_m R_m v_m^2}{Q_{Am}} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3-73)$$

実物・モデルの両系を同一の土で実験する場合，

$$N_m = n^{1.5} \sqrt{\frac{Q_{Am}}{Q_A}} N \quad \dots\dots\dots (3-74)$$

$$v_m = n \sqrt{\frac{Q_{Am}}{Q_A}} v \quad \dots\dots\dots (3-75)$$

となり、 Q_A , Q_{Am} を求めれば、それぞれモデルに与えるべき N_m , v_m が得られる。相似条件を与えることができれば、次の予報式が成立する。

$$\frac{T}{R^2 Q_A} = \frac{T_m}{R_m^2 Q_{Am}} \quad \dots\dots\dots (3-76)$$

前項と同じように乾燥砂を対象とする場合は、 $Q_A = n^2 \cdot Q_{Am}$ なる関係があるから（実験[1b]、図 3-10 を参照のこと）、 T_m は、

$$T_m = \frac{1}{n^4} T \quad \dots\dots\dots (3-77)$$

となる。

以上、土の因子の選定方法により、四つの場合について予報式および相似条件を誘導した。そして、土の因子を含めない場合および特定の条件下（たとえば、乾燥砂の場合）では、モデルのロータリ刃耕うんトルクが縮尺比 n のみによって実物のトルクと関係づけられることを示した。

本実験においては、(3-41)式で示される相似条件に従って実験の組合せを設定するとともに、貫入抵抗試験の結果から、 Q_p , Q_A を求め実験結果を考察する。

3. 実験方法

1) 供試耕うん爪

わが国で最もよく用いられる標準型な爪を実物として選定し、そのモデル製作を久保田鉄工株式会社に依頼した。図3-35に実物の耕うん爪の形状と寸法を示す。図中、丸印で囲んだ耕うん軸中心、すなわち、回転中心 O と O から最も離れた爪先端部までの距離を耕うん爪の回転半径と呼び、 R とその記号とする。また、切削中 B は爪の断面における中心線から爪先端部までの長さを示すこととする。実物の耕うん爪を基準として、その 80, 60, 40 % の寸法を持つモデルを計画したが、実際には、表3-45にその諸元を示すように、80, 62, 44 % の寸法を持つモデル M-1, M-2, M-3 が製作された。耕うん爪は形状が複雑であり、角度は同一に保った上ですべての長さを所定の縮尺に合わせて製作することは困難である。表中にも見られるように、爪先端部の厚さは必ずしも縮尺が合致していない。先端部の厚さは耕うんトルクに比較的大きな影響をもたらすことが予測されたが、M-1, M-2 を主体とし、M-3 は参考程度に乾燥砂の実験で用いることにした。

2) 乾燥砂および人工土

実験〔1a, 2〕で用いた標準砂および表3-46に示す2種類の人工土を供試した。

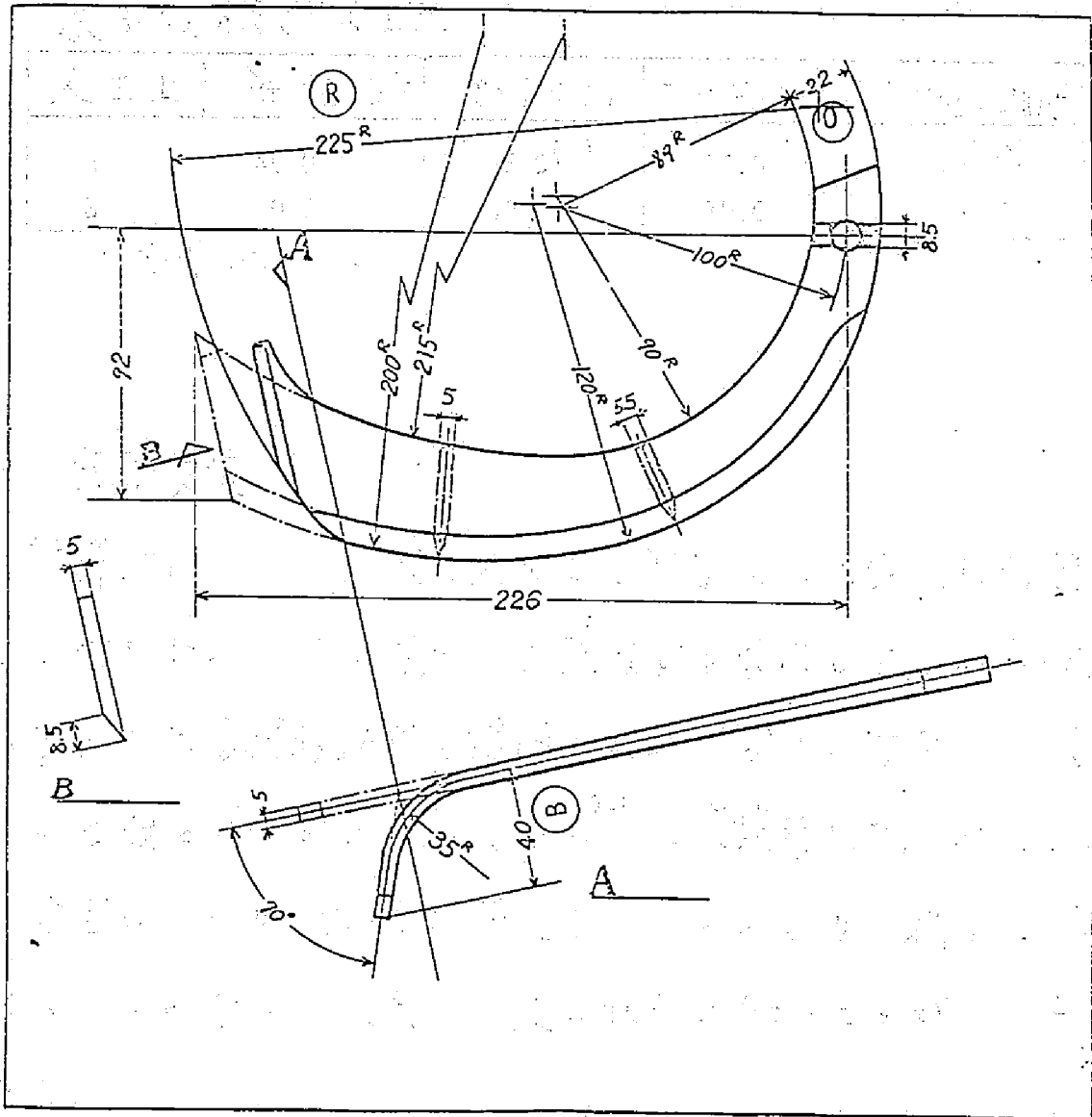


図 3-35, 供試ロータリル (Pル)

表3-45,供試耕種地主要諸元

耕うん机	回転半径 R mm	切削巾 B mm	先端厚 さ mm	屈曲角 °	曲率半径 mm	縮尺	縮尺比 n
P	225	40	6	70	35	1.00	1.00
M - 1	180	32	4	70	28	0.80	1.25
M - 2	140	25	3	70	25	0.62	1.61
M - 3*	100	18	2.5	70	18	0.44	2.25

* M-3 は乾燥砂を対象とした実験のみに使用した。

表 3-46 供試人工土

人工土	鑄物砂	ベントナイト	シリンドライル	練り返し時間
A	45.0(%) [*]	45.0(%)	10.0(%)	10(分)
B	40.5	40.5	19.0	5

* 重量パーセント

3) 実験装置

乾燥砂における実験と人工土を対象とした実験は時期を異にして行なわれ、その都度、実験装置を製作した。両実験装置はいずれも土壤槽移動式を採用したが、ガリレオ変換が成立することは既に明らかにされている⁷²⁾。土壤槽移動式の利点は、測点を含むロータリ駆動系を固定することにより、耕うん条件およびトルクや分力の測点を一定の状態に保つことができることである。

1) 実験装置 (1)

乾燥砂—ロータリ系の実験装置を図 3-36 に示す。可変速モータから耕うん軸までの全駆動系が取り付けられた台枠を直径 25 mm の丸鋼を用いた 4 本の柱によって支持し、その柱上の固定位置を変えることによって耕深を調節した。土壤槽の移動は角鋼に溶接したチェーンをスプロケット駆動する方法を採用した。

- | | |
|--------------------------|----------------------|
| ① 変速モータ(1PS) | ⑥ ストレイン・ゲージ |
| ② チェーン・スプロケット | ⑦ 車軸速度検出用
ピックアップ |
| ③ 耕うん軸 | ⑧ 耕うん速度検出用
ピックアップ |
| ④ 土壌槽
(200×67×22, cm) | ⑨ 支持柱 |
| ⑤ スリップ・リング | ⑩ 台枠固定用大ナット |

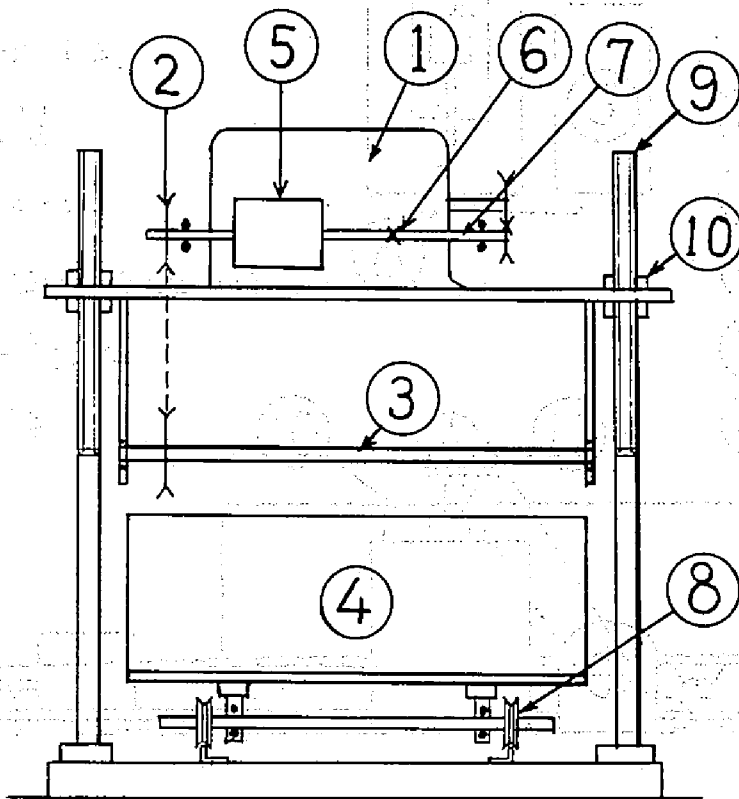


図 3-36 実験装置 (1)

ii) 実験装置 (2)

人工土ロータリ系に用いた実験装置を図 3-37 に示す。耕うん軸駆動系を剛性の大きなベンチに固定し、土壌槽の高さの調節および土壌槽中の人工土量の微調節により所定の耕深を与えた。そのために、土壌槽全体を吊り上げる門型フレーン装置および均平操作を兼ねた表土調整装置を製作した。

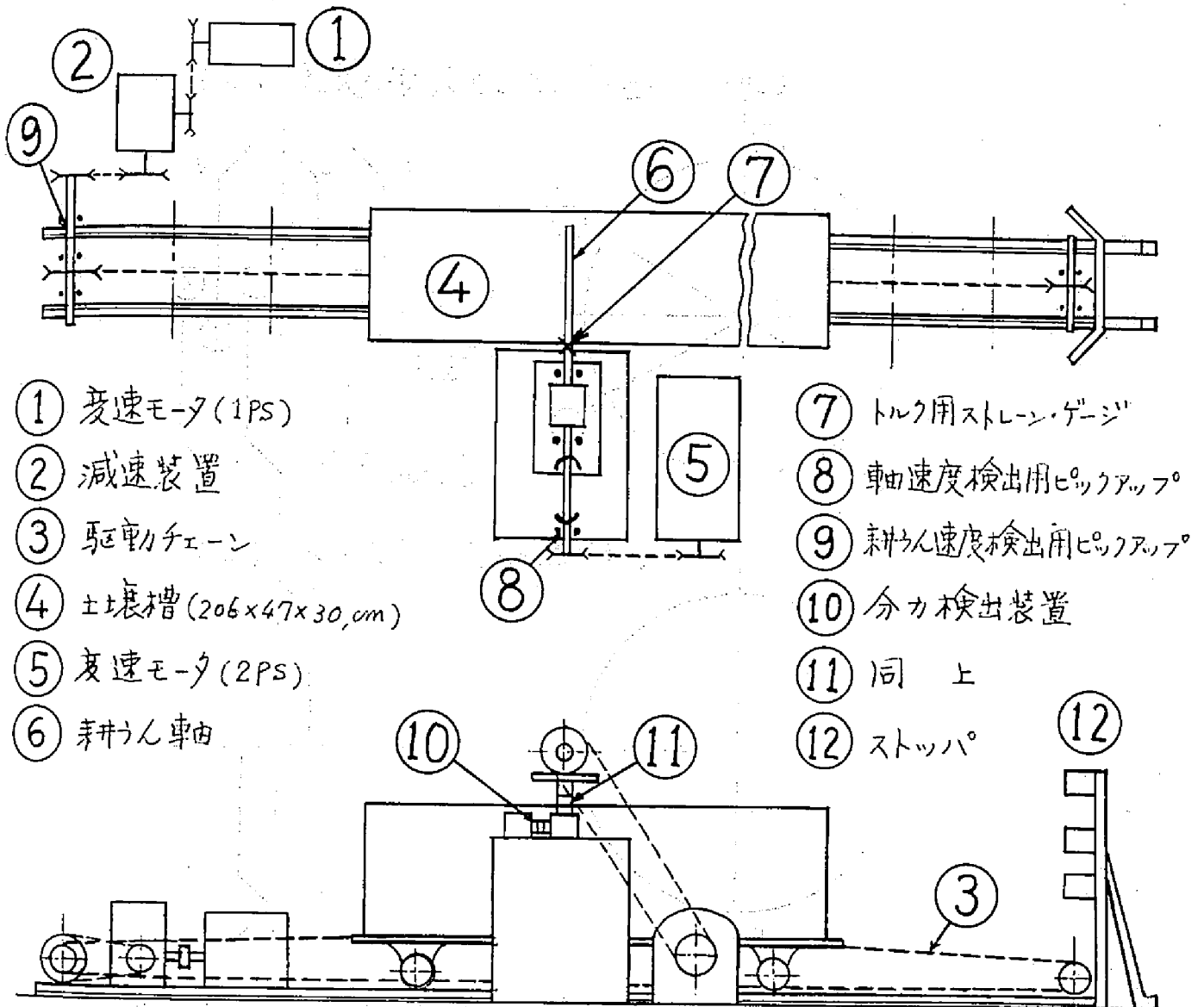


図 3-37. 実験装置 (2)

4) 刃の配列方式

同時打込み，残耕や二重交差を避け，左右交互に打込むという刃の配列に関する基本条件に従って，乾燥砂と人工土Aにおける実験では，図3-38.(a)に示す配列方式を採用した。人工土Bでは，耕うん軸駆動のための変速モータの容量を考慮の上，図3-38.(b)に示すように2本の刃を取り付けた状態につ

いて実験を行なった。

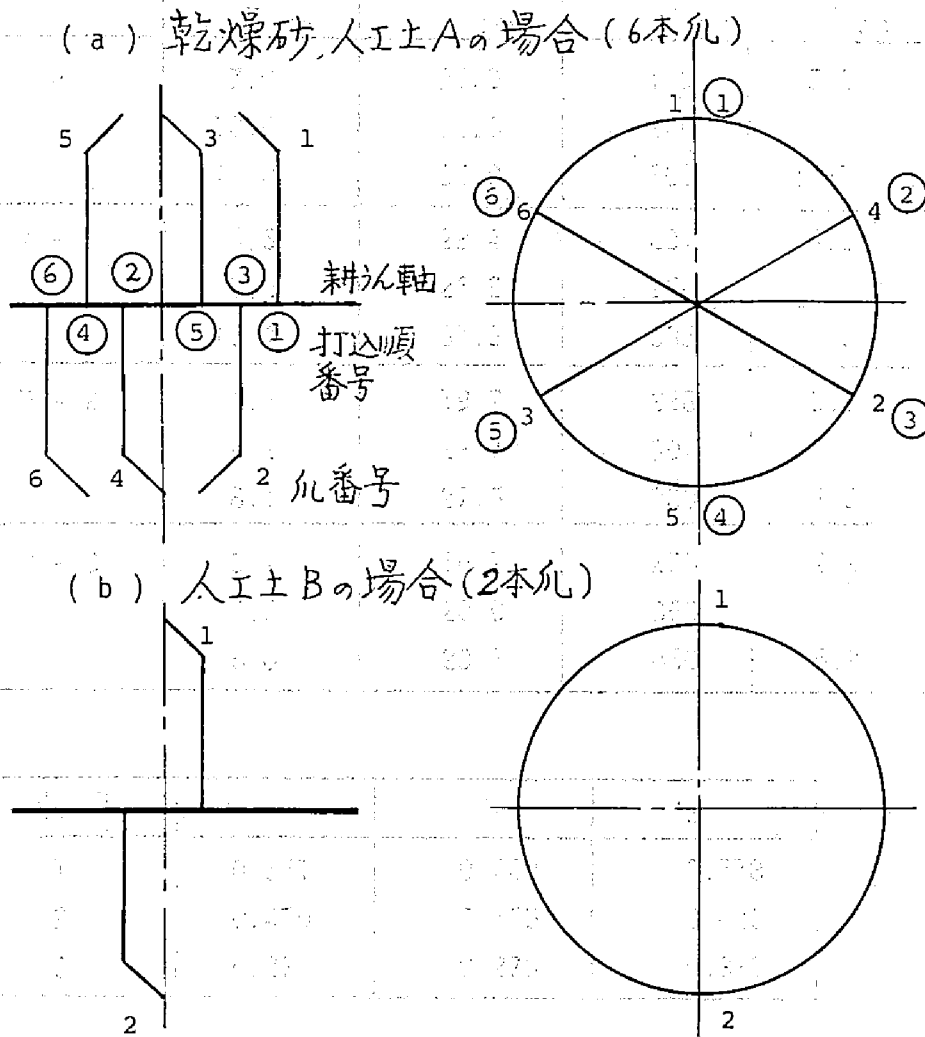


図 3-38, 耕うん孔の配列

5) 実験の組合せ

実際のロータリ作業条件をふまえ、耕うん孔Pに対して、 Z , v , N の各値を3水準ずつ決定し、モデルの耕うん孔については相似条件を与える(3-41)式に基づいて、それぞれ、 Z_m , v_m , N_m を算出した。表 3-47 に Z , v , N およびそれらに関する無次元量を示すが、1種類の耕うん孔について $3^3 = 27$ 回、土の種類が3種類であるから、合計 243 回の実験を行なった。

表3-47, 実験組合せ

	Z cm	V cm/s	N rpm	(耕うんピッチ) p cm
P	7.0	25.0	180	5.0
	10.0	30.0	240	
	13.0	35.0	300	11.7
M - 1	5.6	22.4	201	4.0
	8.0	26.8	268	
	10.4	31.3	335	9.3
M - 2	4.4	19.7	228	3.1
	6.2	23.7	304	
	8.1	27.6	380	7.3
M - 3	3.1	16.7	270	2.2
	4.0	20.0	360	
	5.8	23.3	450	5.2

水準	Π_V	Π_N	Π_Z
1	0.571	0.440	0.578
2	0.470	0.360	0.445
3	0.274	0.270	0.312

6) 測定およびデータ処理方法

図3-36, -37, に示したように, 乾燥砂と人工土における両実験に共通して設けた測定量は, i) 耕うん軸トルク ii) 耕うん軸回転速度 iii) 耕うん速度である。トルクの測定にはストレイン・ゲージ利用による方法を, 速度の測定には非接触型パルス・ピックアップを用いた。なお, 人工土を対象とした実験装置(2)には, 耕うん抵抗の3方向分力およびモーメントを測定するため, 2個の八角形リングから成る検出装置を設置した。

しかし、同検出装置の検定およびたわみ固有振動数を調べた結果、ひずみ感度に関しては軸方向分力を除き良好な結果が得られたが、たわみ固有振動数は水平方向の打撃による自由振動により $25 \sim 40 \text{ Hz}$ 、垂直方向には $15 \sim 35 \text{ Hz}$ と低い値を示した。各値に中があるのは、装着する耕うん刃の種類によって差を生じたためである。上記のたわみ固有振動数は、耕うん刃を6本、耕うん軸回転速度を $180 \sim 380 \text{ rpm}$ ($18 \sim 38 \text{ Hz}$ に相当する) とする場合、共振現象をもたらすことが十分予測された。したがって、予備実験で確認した後、この検定装置を用いることを断念した。

次に、耕うんトルクの算出について述べる。土壌槽の長さは約 2 m であるが、起桌と終桌部分を除くと良好な耕うんがでるのは、中央部の約 1 m 間である。したがって、記録されたトルク線図は短かく、たとえば、トルク頻度計測によって平均トルクや面積表ホのトルク ($\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{deg}$) を求めるにはデータが不十分である。本実験では、自動面積測定器 (Automatic Area Meter; AA-M型、林電工株式会社製) を利用し、耕うん軸5回転についてそのトルク線図の面積を求め、6本刃の場合には平均トルク ($\text{kg} \cdot \text{m}$)、2本刃の場合には面積トルク ($\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{deg}$) を算出した。なお、この自動面積測定器は、最小目盛 1 mm^2 、 $10,000 \text{ mm}^2$ 付近において、 $\pm 2\%$ の精度の性能を持っている。

7) 土の準備方法

終了した実験による影響を消去するため、砕土・鎮圧を目的としたロータリおよび平滑ローラの各装置を製作しその性能を調べた結果、ロータリ砕土装置はとくに側壁に土を圧縮硬化させること、また、平滑ローラは通過後波状の模様を残すことがわかった。これらは、いずれも土壌槽中の土を不均一にするものであり、望ましくない。したがって、ショベルで槽中を十分反転し、柄付き突固め板により鎮圧するという、本研究がこれまで用いてきたと同様の方法をこの実験においても採用した。

8) 土に関する測定

i) 密度の測定

採土器（大起理化工業株式会社製、DIK-1型）を利用し、深さ15 cmまで5 cm間隔で、各100 mlの土を採取し、その重量を測定し密度を求めた。その結果を図3-39に示す。乾燥砂については、当時採土器を利用できなかったため、手近かの缶を用いて表層約10 cmまでの採取の結果である。

ii) セン断試験

直径50 mmのセン断箱を持つ一面セン断試験機（丸東製作所製、モータ駆動型）を用いて、セン断試験を行なったところ、人工土Aでは、 $c = 0.17 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\phi = 26.1^\circ$ 、人工土Bでは、 $c = 0.80 \text{ kg/cm}^2$ 、 $\phi = 23.7^\circ$ であった。実験に用いた人工土は

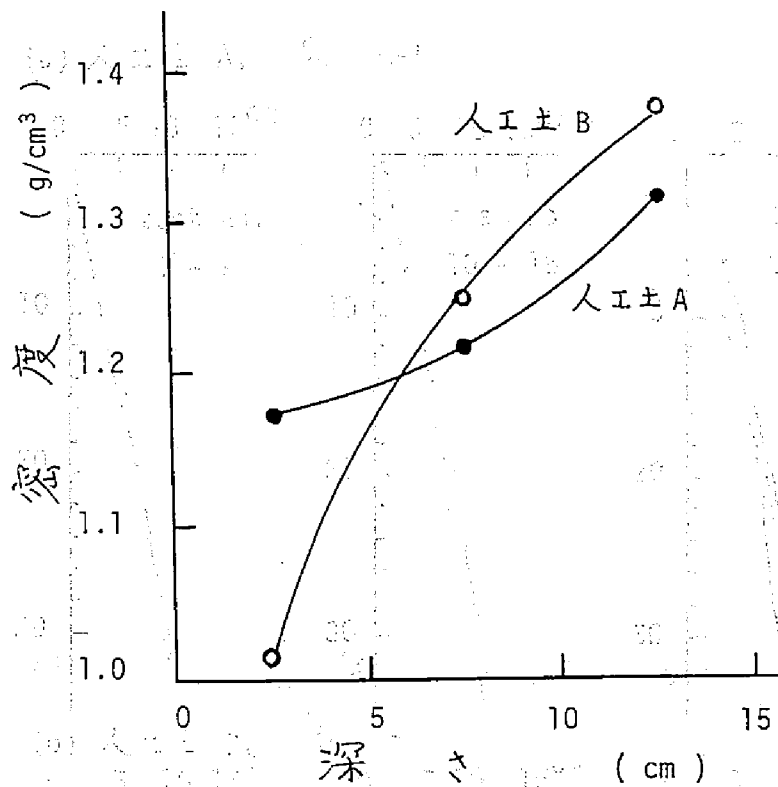


図 3-39, 土壤槽中の人工土密度

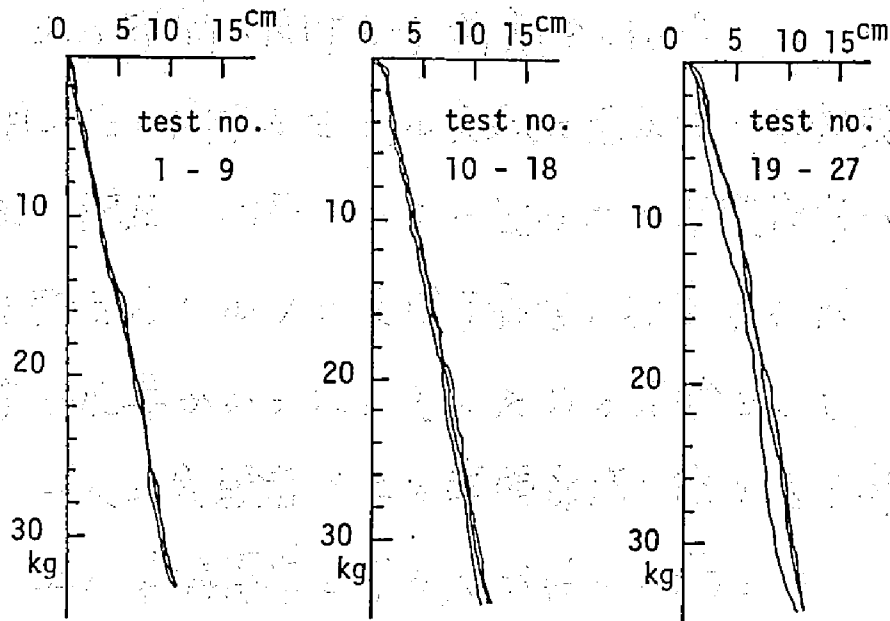
C, 中ともに表 3-39 の結果に比べると大きな値を示した。これは、本実験が 11.5°C という低温下で行なわれたためである。

iii) 貫入抵抗の測定

土壤槽中の任意の個所で迅速に貫入抵抗を測定するため、TN-4 型貫入計 (丸東製作所製) を用いた。土壤表面から直ちに貫入抵抗値の得られる、直径 48 mm の鋼製円板を貫入体として採用した。

貫入抵抗の測定は、各凡について耕深を変えるごとに、土壤槽の中央部分で 3~5 個所を選定し、同一人によって行なわれた。図 3-40 にその記録の一例を示す。貫入深さ-貫入抵抗線図は人工土 A, B ともに直線に近似しうるものであり、実験を通じて直線の勾配に大きな変化は認められなかった。

(a) 人工土 A, 凡 M-1



(b) 人工土 B, 凡 P

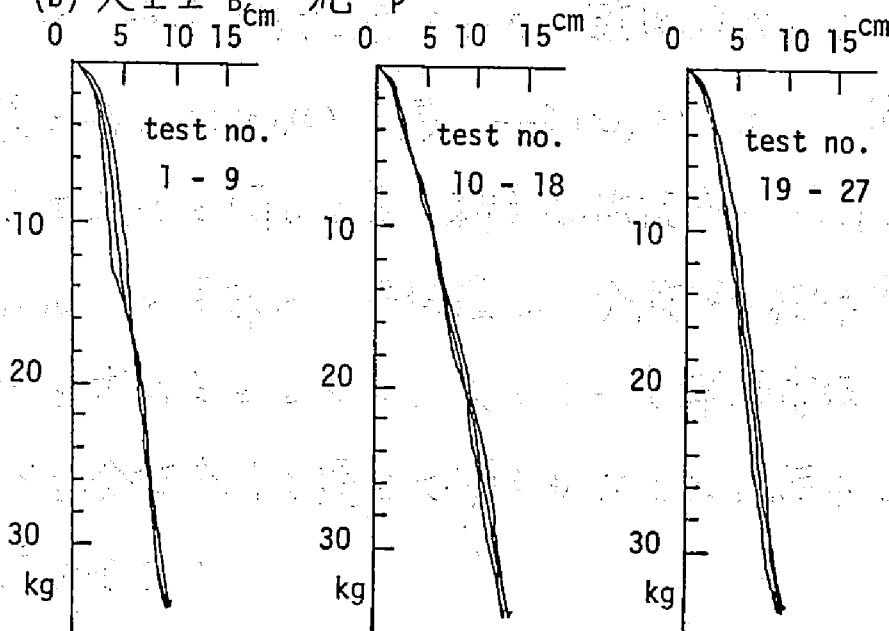


圖 3-40, 貫入抵抗記錄線圖

4 結果および考察

1) 土の準備に関する予備実験の概要

相似性に関するモデル実験に先立ち、各実験終了後に行なう砕土・鎮圧・均平という一連の土の準備操作が、系の特性値である耕うんトルクに及ぼす影響、換言すれば、土の再現性を検討する必要があった。そのための実験として、

A) 一人の実験者が土の準備操作を繰り返す場合

B) 土の準備操作をする人が異なる場合

について、予備実験を行なった。乾燥砂および人工土Aについて、表3-41(a),(b),(c), 表3-42(a),(b) にその結果を示す。なお、人工土Aに関しては、耕うん抵抗分力の測定も行ない、耕うんトルクと同様に、平均値 m , 分散 σ^2 , 標準偏差 σ , 変動係数 $C.V$ を求めるとともに、人によって準備操作が影響を及ぼすか否かを分散分析を通じて明らかにした。結果を要約すると、次の通りである。

a) 同一人が土の準備操作を行なう場合、耕うんトルクおよび耕うん抵抗分力の変動係数は、乾燥砂と人工土において、いずれも数パーセントを示し、高度に再現性があることが判明した。

b) 土の準備操作をする人が異なっても、耕うんトルクと耕うん抵抗分力には有意差が認められない。

表3-41 (a), 同一人の繰り返し実験における耕うんトルク
(乾燥砂, P, Z=13 cm, V=25.5 cm/sec, N=177 rpm)

No.	kg-m	No.	kg-m	
1	0.8978	6	0.8928	$m = 0.9002$ kg-m $\sigma^2 = 0.0007$ $\sigma = 0.0273$ kg-m C.V. = 3.1 %
2	0.9293	7	0.8582	
3	0.8904	8	0.9162	
4	0.9162	9	0.9312	
5	0.8830	10	0.8691	

(b) 人の異なる場合の結果 (A, Bは実験者)

(乾燥砂, P, Z=13cm, V=25.0cm/sec, N=175rpm)

No	A, kg-m	B, kg-m
1	0.8801	0.8534
2	0.9289	0.8585
3	0.8641	0.8496
4	0.8217	0.7799
5	0.8991	0.8578
6	0.8591	0.8680
7	0.9581	
8	0.8661	
9	0.8534	

(c) 分散分析表

SV	SS	DF	MS	F ₀	F(0.05)	F(0.01)
人	6844	1	6844	2.67	4.67	9.07
E	33331	13	256			
計	40175	14				

表 3-42 (a), 耕うんトルクと分力 (人エ土 A)

人	No	耕うんトルク	上下方向分力	前後方向分力
A		kg-m	kg	kg
	1	0.5507	4.490	3.348
	2	0.4935	4.633	3.201
	3	0.5298	4.435	3.415
	4	0.5440	4.980	3.345
	m	= 0.5295 kg-m	4.6355 kg	3.330 kg
	σ^2	= 0.0007	0.111	0.031
	σ	= 0.0265 kg-m	0.334 kg	0.177 kg
	C.V	= 5.0 %	7.2 %	5.3 %
		kg-m	kg	kg
B	1	0.5235	3.876	3.017
	2	0.5899	4.179	3.499
	3	0.5394	4.189	3.383
	m	= 0.5509 kg-m	4.081 kg	3.300 kg
	σ^2	= 0.0014	0.096	0.021
	σ	= 0.0369 kg-m	0.310 kg	0.145 kg
	C.V	= 6.7 %	7.6 %	4.4 %

実験条件

P 凡

Z₁ = 7 cm

V = 24.0 cm/sec

N = 230 rpm

(b), 分散分析表 (耕うんトルク)

SV	SS	DF	MS	F	F(0.05)	F(0.01)
人	8.68	1	8.68	0.928	6.61	16.26
E	46.75	5	9.35			
計	55.43	6				

分散分析表 (上下方向分力)

SV	SS	DF	MS	F	F(0.05)	F(0.01)
人	0.0268	1	0.0268	0.541	6.61	16.26
E	0.2475	5	0.0495			
計	0.2743	6				

分散分析表 (前後方向分力)

SV	SS	DF	MS	F	F(0.05)	F(0.01)
人	0.3725	1	0.3725	5.08	6.61	16.26
E	0.3675	5	0.0735			
計	0.7400	6				

2) 結果の概要

耕うんトルクと耕深, 耕中, 耕うん速度, 耕うん軸回転速度等の各因子の関係については, これまで数多くの研究がなされている。^{72)~75)}しかし, それらの成果の概要を総括した J.G. Hendrick, W.R. Gill の論文^{76)~79)}に指摘されているように, まだ多くの不明な点が残されている。

本実験の主目的は相似性成立の有無にあり, 耕うんトルクと個々の因子との関係を追求することではないが, 各耕うん凡による耕うん現象が相似であるためには, 少なくとも耕うんトルクに対する各因子の影響度が同じであることが必要である。そこで, まず, 分散分析法により検討した。

表3-48 および表3-49は Σ , v , N を各3水準, 繰り返しなしの三元配置法に基づく分散分析結果である。乾燥砂では, Σ , v , N について, どの耕うん凡に關しても高度の有意差を認めた。しかし, 寄与率を見ると, P と $M-1$ はほぼ同様であるが, $M-2$ は v の効果が顕著であり, 他の耕うん凡とは異なっていることが指摘しうる。人工土 A においては, $M-1$ で v の効果が認められないという結果が得られた。 Σ については, おおよそ同じ寄与率を示したが, v の有意差が認められなかったことは, $M-1$ の場合には, 他の耕うん凡による耕うん現象とは異なった耕うんがなされたことが総体として言える。また, 人工土 B についても同様に分散分析を通じ検討した結果, 乾燥砂, 人工土

表 3-48, 分散分析表 (乾燥砂)

(P)

SV	SS	DF	MS	F ₀	F(0.05)	F(0.01)	CF(%)
Z	18622	2	9311	1425**	8.65	4.46	88.3
V	1236	2	618	94**			5.9
N	717	2	359	54**			3.4
Z x V	330	4	83	13**	7.01	3.84	1.6
Z x N	110	4	28	4.2*			0.5
V x N	24	4	6	0.9			0.1
E	52	8	6.5				0.2
計	21091	26					100.0

(M-1)

SV	SS	DF	MS	F ₀	F(0.05)	F(0.01)	CF(%)
Z	2002	2	1001	235.5**	8.65	4.46	81.4
V	207	2	104	24.4**			8.4
N	58	2	29	6.8			2.4
Z x V	12	4	3.5	0.7	7.01	3.84	0.5
Z x N	139	4	35	8.2**			5.6
V x N	7	4	1.8	0.4			0.3
E	34	8	4.3				1.4
計	2459	26					100.0

(M-2)

SV	SS	DF	MS	F ₀	F(0.05)	F(0.01)	CF(%)
Z	116	2	58	77.3**	8.65	4.46	29.7
V	239	2	120	159**			61.1
N	19	2	9.5	12.7**			4.9
Z x V	4	4	1.0	1.3	7.01	3.84	1.0
Z x N	3	4	0.75	1.0			0.8
V x N	4	4	1.0	1.3			1.0
E	6	8	0.75				1.5
計	391	26					100.0

表 3-49, 分散分析表 (人工土 A)

(P)

SV	SS	DF	MS	F	F(0.05)	F(0.01)	CF(%)
Z	20925	2	10462	91.1**	8.65	4.46	73.7
V	1542	2	771	6.7*			5.4
N	2474	2	1237	10.8**			8.7
Z x V	2318	4	579	5.1*	7.01	3.84	8.2
Z x N	85	4	21	0.2			0.3
V x N	128	4	32	0.3			0.5
E	918	8	114.8				3.2
計	28390	26					100.0

(M-1)

SV	SS	DF	MS	F	F(0.05)	F(0.01)	CF(%)
Z	2839	2	1419	91.8**	8.65	4.46	82.2
V	64	2	32	2.1			1.9
N	248	2	124	8.0*			7.2
Z x V	44	4	11	0.7	7.01	3.84	1.3
Z x N	98	4	24	1.6			2.8
V x N	38	4	9	0.6			1.1
E	124	8	15.5	-			3.5
計	3455	26					100.0

(M-2)

SV	SS	DF	MS	F	F(0.05)	F(0.01)	CF(%)
Z	1211	2	651	279**	8.65	4.46	81.8
V	73	2	36	16**			4.9
N	95	2	47	20**			6.4
Z x V	59	4	15	6*	7.01	3.84	4.0
Z x N	14	4	3.5	1.5			0.9
V x N	10	4	2.5	1.1			0.7
E	19	8	2.38				1.3
計	1481	26					100.0

A以上に Z, v, N の T に対する効果が各耕うん凡間で異なることが判明した。

排土板、トラック・シューのように単純けん引に対する抵抗を問題とした実験〔1, 2〕とは異なり、周速 7 m/sec に達する高速切削現象を扱うことから、僅かな条件の差異が耕うんトルクに大きく影響するのであろう。また、方法の項にも記したように分力検出装置の八角形リングが、耕うん軸系のたわみ固有振動数を低下させ、良質のトルク測定を妨げた点も指摘しなければならない。

データ全体としての結果は上述の通りであるが、耕うんトルクが耕うん軸系の共振により明らかに影響を受けたと考えられる場合を除いて、更に、結果の考察をすすめることにする。

3) T と Z, v, N との関係

T と Z, v, N との関係についての従来の研究成果を見ると、 Z, v, N のうちの2個を固定し、残る因子を段階的に変えた場合の耕うんトルクの変動状態をグラフにしたものが多く、3因子が変動する際に耕うんトルクがいかなる値を示すかを知らねば、上述のグラフを利用して算出しなければならなかった。

ところで、B. N. Ghosh⁸⁰⁾によるロータリのモデル実験結果を見ると、耕うんトルクが次式で示されることが報告されている(図3-43)。

B. N. GHOSH

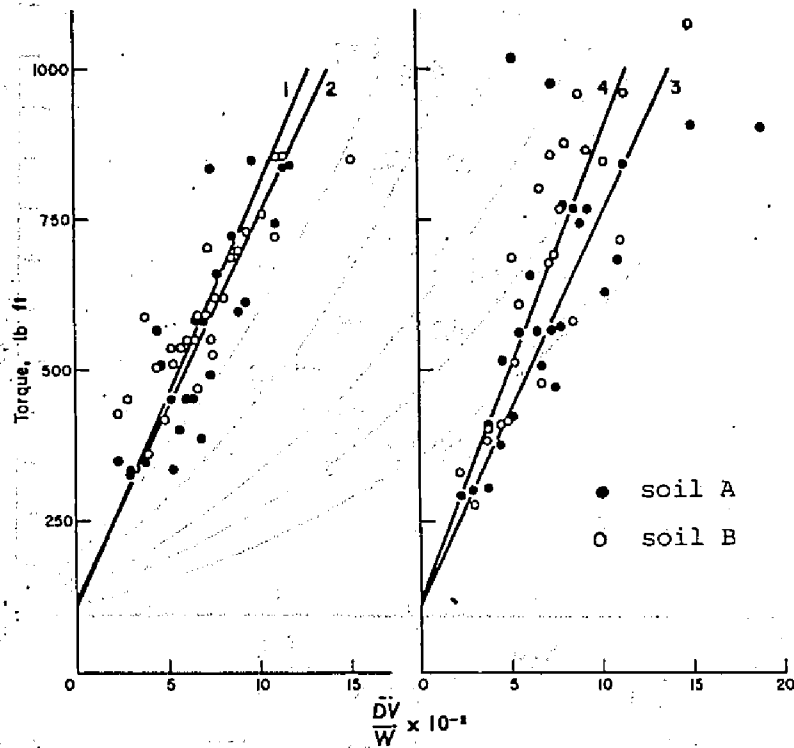


Fig. 5. Correlation equation of Soils A and B
(1) 13.50% m.c.; (2) 28.10%; (3) 10.82%; (4) 25.10%

図 3-43 B.N. Ghosh による実験結果の表現法

$$T = A + B \left(\frac{DV}{W} \right) \dots\dots\dots (3-78)$$

ここで、
A, B; 土壌の種類、水分等によって定まる定数
A = (105~120), B = (7500~8900) の値を得た。

D; 耕深
V; 耕うん速度
W; 耕うん軸回転速度

本実験の乾燥砂および人工土 A について、耕うん力 P の結果を図 3-44, 3-45 に示す。B.N. Ghosh による図よりも横軸方向に拡大し、測定値を示す各点に耕うんピッチを記入してみると、図中実線で示しているように、各点は耕うんピッチをパ

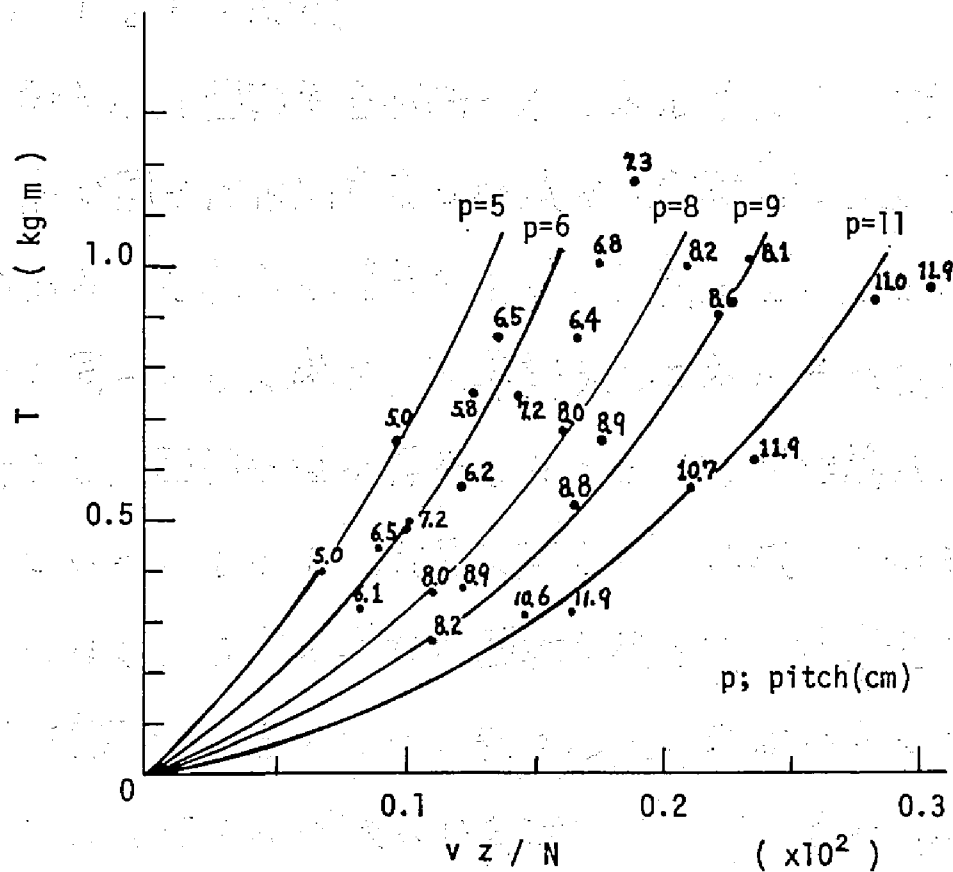


図 3-44, T と $v z / N$ の関係 (乾燥砂)

ラメータとして位置していることがわかる。したがって、(3-78) 式のように、全データを一括した回帰直線を求めるよりも、耕うんピッチをパラメータとして一層精度の良い耕うんトルクの値を推定できるものと考ええる。

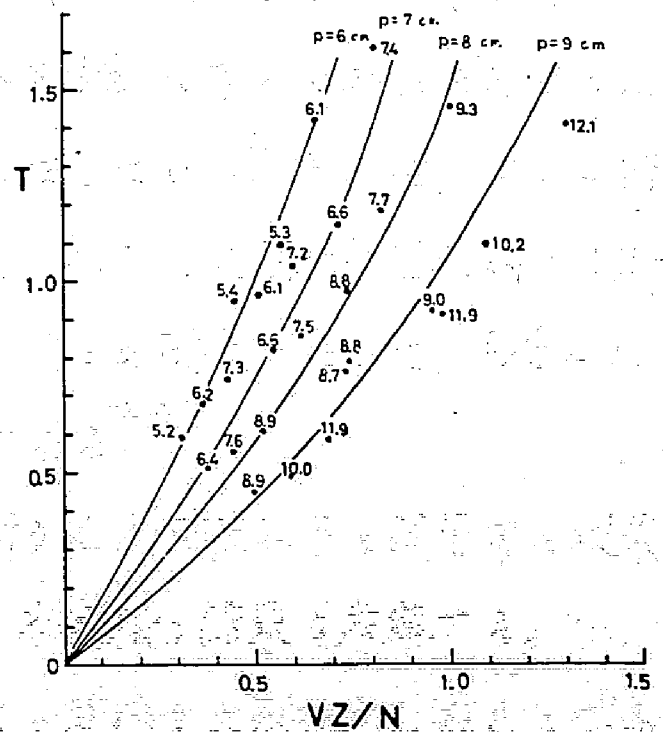


図 3-45, T と $v z / N$ の関係 (人工土 A)

4) TとRの関係

耕うん丸回転半径が耕うんエネルギーに及ぼす影響については、わが国では旧関東東山農試での実験⁸¹⁾および松尾氏による研究⁷²⁾がある。それらの結果を見ると、耕深を一定とし、その他の条件を同一とした場合、所要耕うんエネルギーが最小になるような耕うん丸回転半径が存在したことおよび理論的にも存在するとしている。しかし、厳密に言えば、供試した耕うん丸は相似形ではなく、唯単に異なる回転半径を持つ標準型な丸であり、相似性実験とは言えない。耕うん丸の形状が定まり、いかなる大きさに製作すれば良いかを決定する際の参考資料にはなるが、結果の予報精度は期し難いと言える。また、詳細不明ではあるが、Grinchuk, Matyashin 両氏は、耕うん条件を等しくして

ロータリの回転半径のみを $\frac{1}{2}$ にすると24%だけ耕うん比エネルギーが減少したことを報告している²²⁾。その他、多くの研究報告を総合して言えることは、耕うん丸回転半径に対する耕深の比、 R/δ と耕うん比エネルギーとの関係について、 $R/\delta = 1.1 \sim 1.4$ が最適であるという事である。^{76)~79)}

以上、耕うんエネルギーと耕うん丸回転半径に係る従来の研究成果の一端を踏まえて、本実験の結果を考察する。

図3-46, (a), (b) はTとRの関係を土別に示したものである。耕うんトルクは耕深によって最も大きな変動を示すことが前項の分散分析の結果認められたので、図中耕深別に耕うんト

トルクの最大・最小値を求め各領域を示してある。たとえば、乾燥砂における結果を見ると、耕深 $z=1$ の場合、図中縦線のハッチング部分のトルクが、 v, N の各組合せの状態を得られたことを示す。人工土 A, B についても乾燥砂と同様に、 $T \propto R^b$ なる関係があることが概観される。そして、 b の値が (乾燥砂) $>$ (人工土 A) $>$ (人工土 B) となっている。実験 [1.2] の乾燥砂では、抵抗すなわち力は長さの約 3 乗に比例する結果が得られたが、トルクについても 4 乗に近い値が得られたことは、回転切削系においても単純けん引系におけるサイズと力の関係が成立することを意味している、と断定できる。また、粘

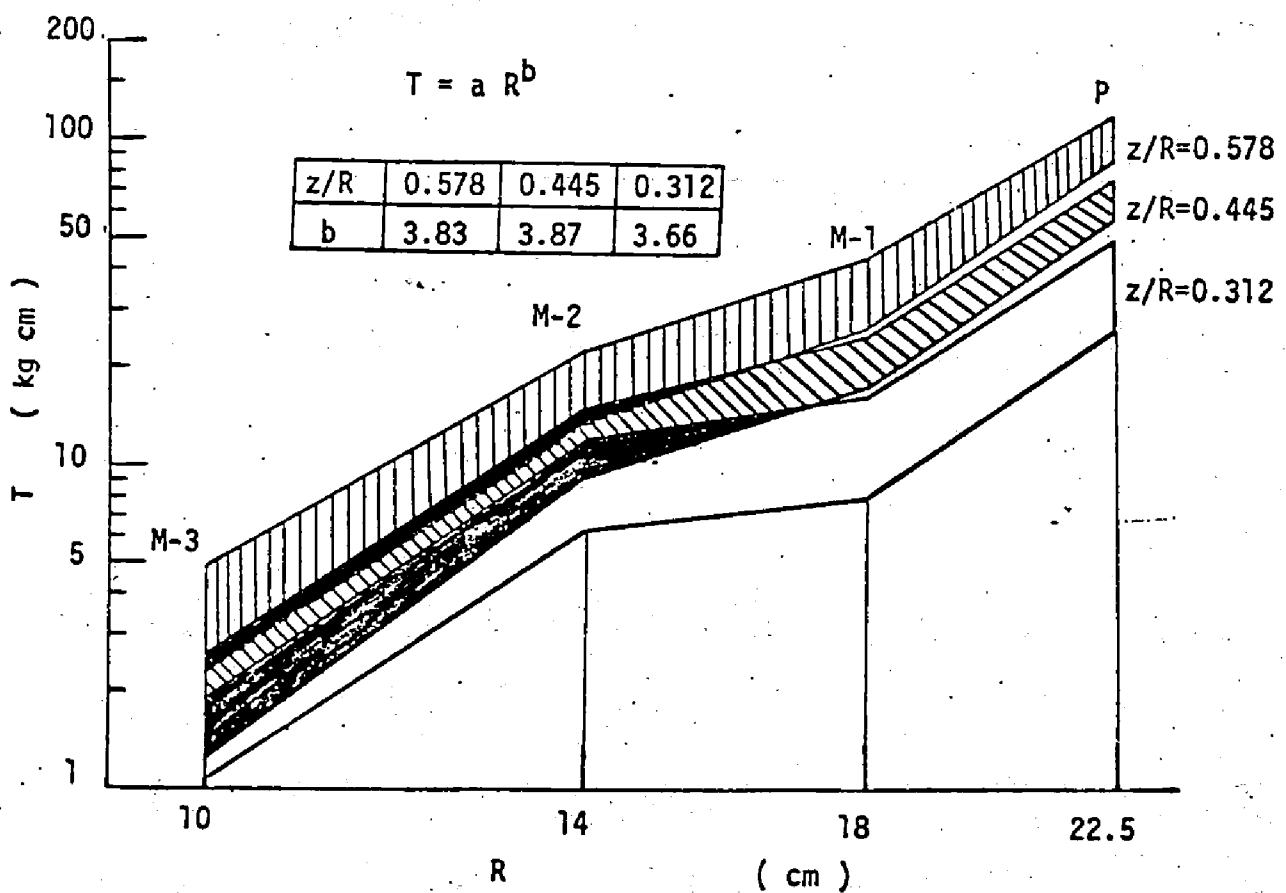


図 3-46 (a), 耕うんトルクと耕うん刃の大きさとの関係
(乾燥砂)

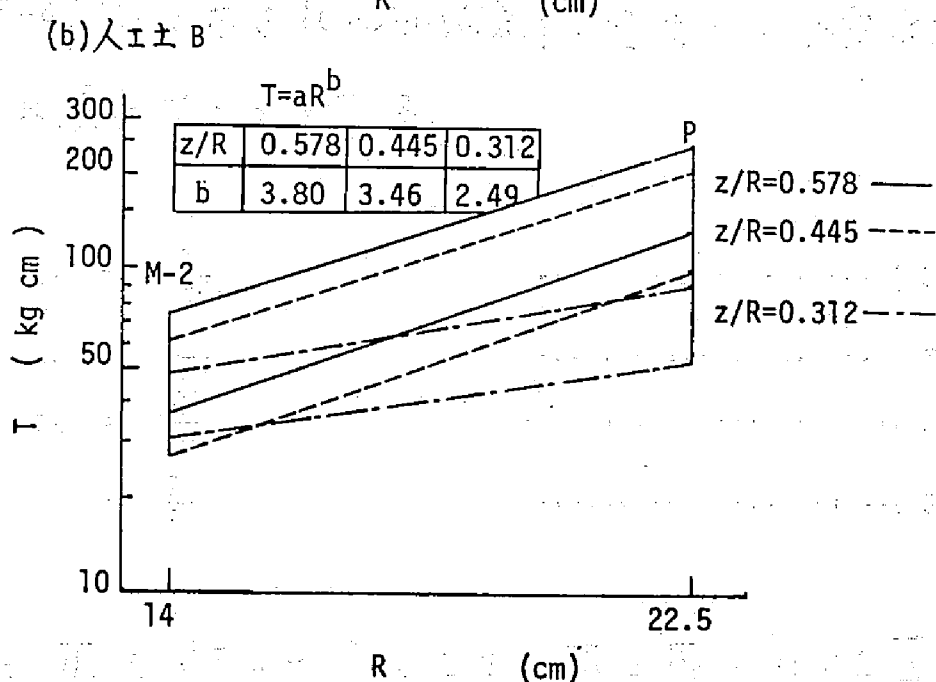
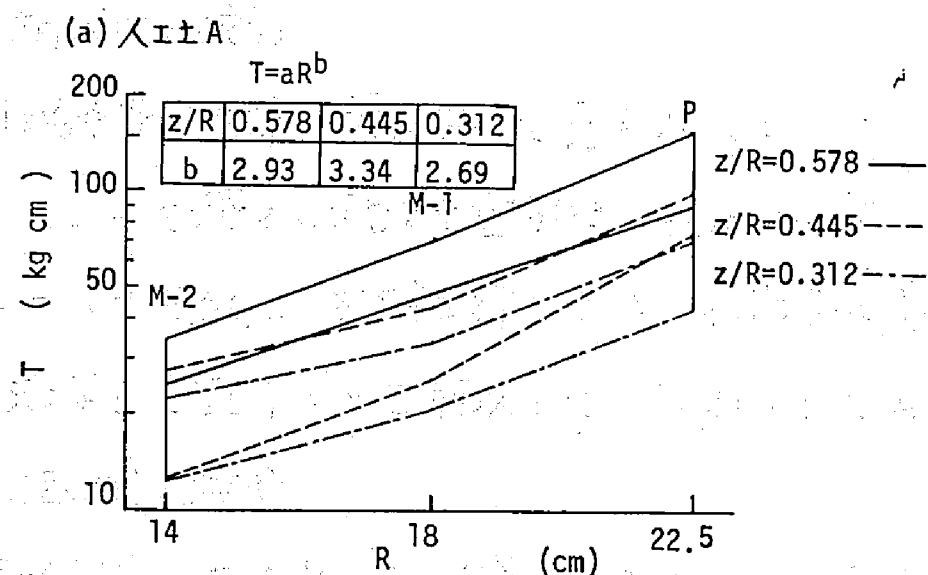


図 3-46 (b), 耕うんトルクと耕うん刃の大きさとの関係
(人エ土 A, B)

着性のある人エ土 A, B では b の値が小さくなってゆく傾向も排土板における結果と符号している。

以上は相似条件下での耕うんトルクと刃の大きさとの関係を見たものであり、 R のみを変え他の耕うん条件を一定に保った場合での結果ではない。

5) 相似性の検討

相似条件の誘導の項において見られたように、選定する土の因子によって種々の無次元量が得られた。以下、乾燥砂と人工土について相似性の検討を行なうが、各場合に応じて π 項の番号を添字して記すことを前以ってお断わりしておく。

A) 乾燥砂の場合

(3-41)式で示される相似条件を意味する各無次元量を下記のように表わすこととする。

$$\pi_1 = \frac{T}{\rho g R^4} \dots\dots\dots (3-79)$$

$$\pi_2 = \frac{v^2}{gR} \dots\dots\dots (3-80)$$

$$\pi_3 = N \sqrt{\frac{R}{g}} \dots\dots\dots (3-81)$$

$$\pi_4 = \frac{Z}{R} \dots\dots\dots (3-82)$$

π_2, π_4 をパラメータとして、 π_1 と π_3 の関係を図3-47に例示する。図は v, Z の最も大きな水準、 $\pi_2=1, \pi_4=1$ と最も小さな水準、 $\pi_2=3, \pi_4=3$ の例であるが、その各場合において、耕うん凡の種類に拘わらず一直線上に各点が位置すれば、完全に相似性が成立したことになる。しかし、図中耕うん凡別に各線が引かれることから、相似性が不成立であったことがわかる。 $\pi_2=1, \pi_4=1$ の場合の方が耕うん凡による差が大きいが、これは、耕うん速度が高く、耕深が大きいほど、4種類の耕うん凡に相似な耕うん現象を生じさせることが難しいことを意味して

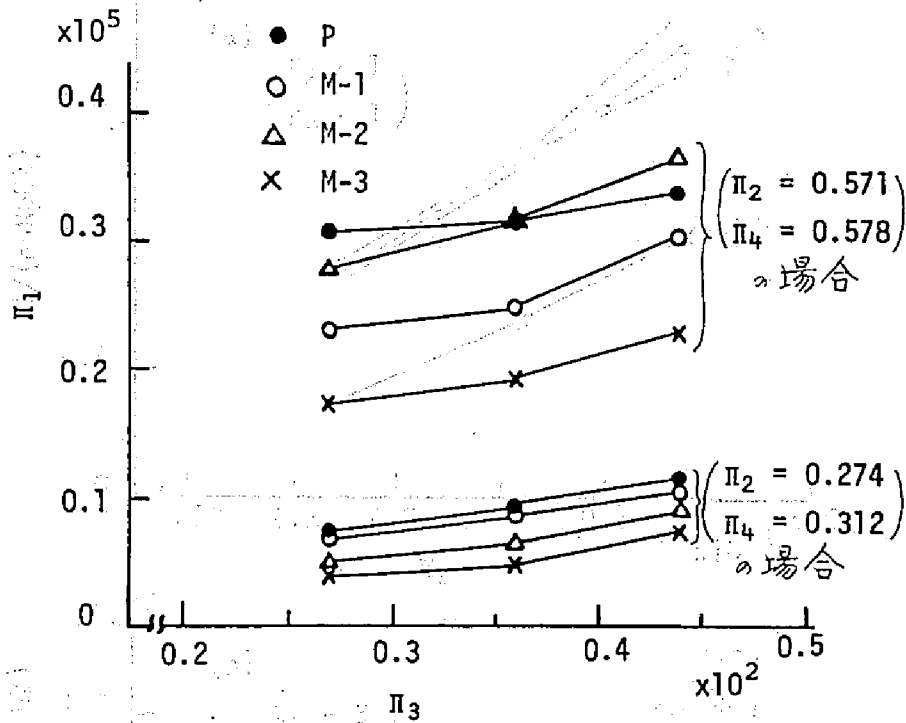


図 3-47, π_1 と π_3 の関係

いる。 π_2 , π_4 の他の組合せの場合についても、ほぼ同様の結果が得られた。

次に、耕うん土壌の単位体積当りのトルクを見ると、図 3-48 の通りである。 $\pi_2=1$, $\pi_4=1$ の場合、最も寸法の小さなモデル M-3 を除いては、比較的直線上に各点位置している。これとは対照的に、 $\pi_2=3$, $\pi_4=3$ では耕うん圧間の差が大きく、直線性も低い。耕うん体積の影響が明らかである。

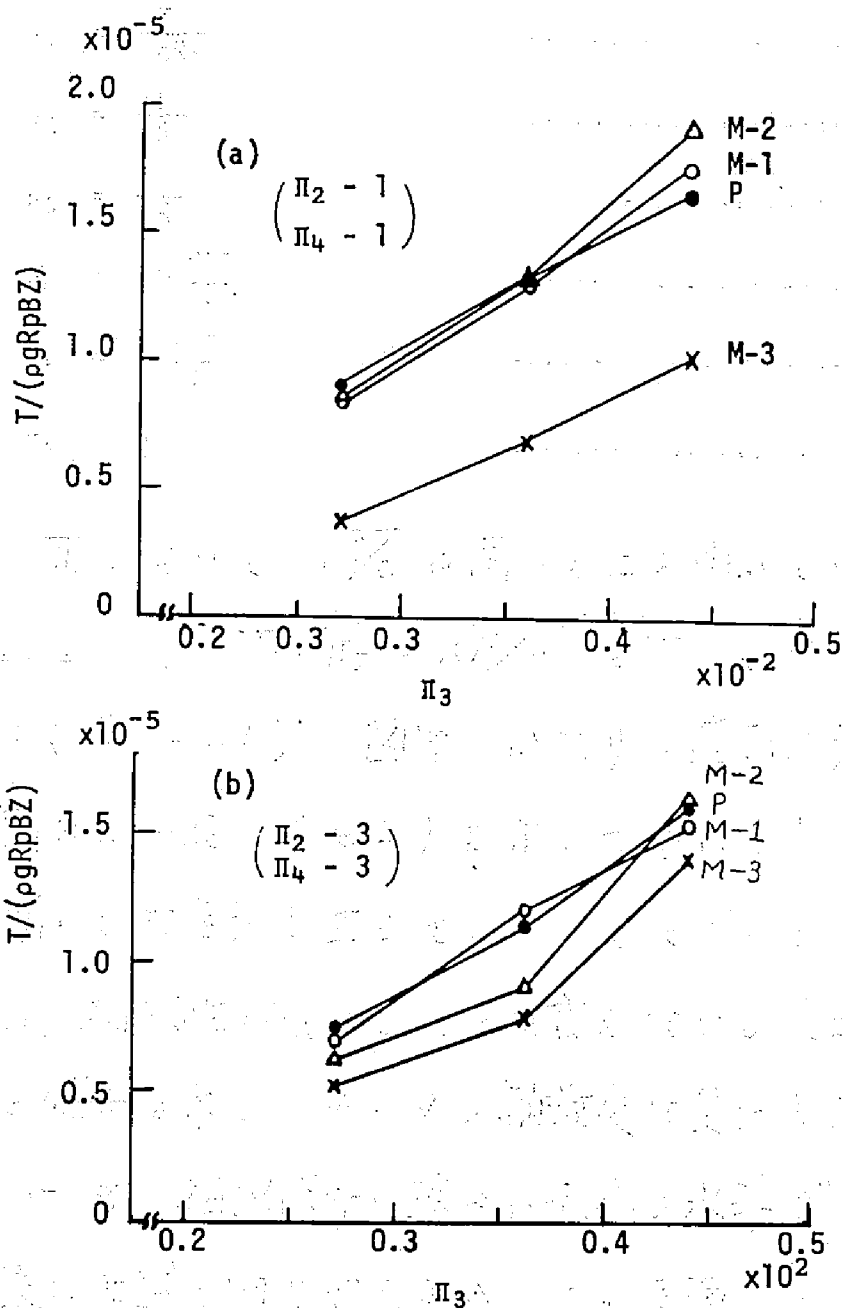


図 3-48, $T/(\rho g R_p B Z)$ と Π_3 の関係

B) 人工土の場合

土質常数 c , ϕ を土の因子として選定する場合, (3-60)式が相似条件であった。各無次元量を次のように表わすこととする。

$$\Pi_1 = \frac{T}{cR^3} \dots\dots\dots (3-83)$$

$$\Pi_2 = \frac{B}{R} \dots\dots\dots (3-84)$$

$$\Pi_3 = \frac{Z}{R} \dots\dots\dots (3-85)$$

$$\Pi_4 = RN\sqrt{\frac{\rho}{c}} \dots\dots\dots (3-86)$$

$$\Pi_5 = v\sqrt{\frac{\rho}{c}} \dots\dots\dots (3-87)$$

$$\Pi_6 = \phi \dots\dots\dots (3-88)$$

Π_4 , Π_5 において, $\sqrt{\rho/c}$ は同一の土を用いているから, 一定である。よって, $\Pi_4/\Pi_5 = RN/v$ と Π_1 との関係を Π_3 別に図示する(図 3-49)。図中, かなりの範囲に点が散在し, 耕うん凡別には一定のまとまりを示してはいるものの, 耕うん凡間には明らかな差異を生じている。したがって, データ全体に關しては, 相似性が成立したとは言えない。人工土 B についても同様の傾向を示し, データの離散度は更に大きかった。

N, v, Z を相似条件に基づいて各3水準ずつ変えた場合の総合結果は上述の通りであるが, その反面, すべての組合せ条件下で相似性が成立しなかったとは言えない。いま, 実験のすべての組合せについて, 各耕うん凡の Π 値, つまり $T/(cR^3)$ の値が近似している例を検討し, その一例を図 3-50(a),(b) に示す。相似条件誘導の項において示した, 耕うんトルクに關する Π 項, $T/(R^3Q_p)$, $T/(R^3Q_A)$ と土の因子を含めず, 重力加速度を含める場合に得られるトルクの Π 項, $T/(\rho g R^3 v^2)$ についても, 耕うん凡 (R で示した) との關係を示し, 土因子の選定による差異

をみたものである。この図からは、土因子を含めない場合、土質常数 c 、 ϕ 中を選定する場合に比較して、貫入抵抗値を用いる方が、3種の耕うん凡の Π 値は接近し、よって、予報上勝れていると言える。ここに示した例と同じ結果が得られたのは数例に過ぎず、実験全体として相似性の成立条件を結論づけるには余りにも早計であると言わざるを得ない。

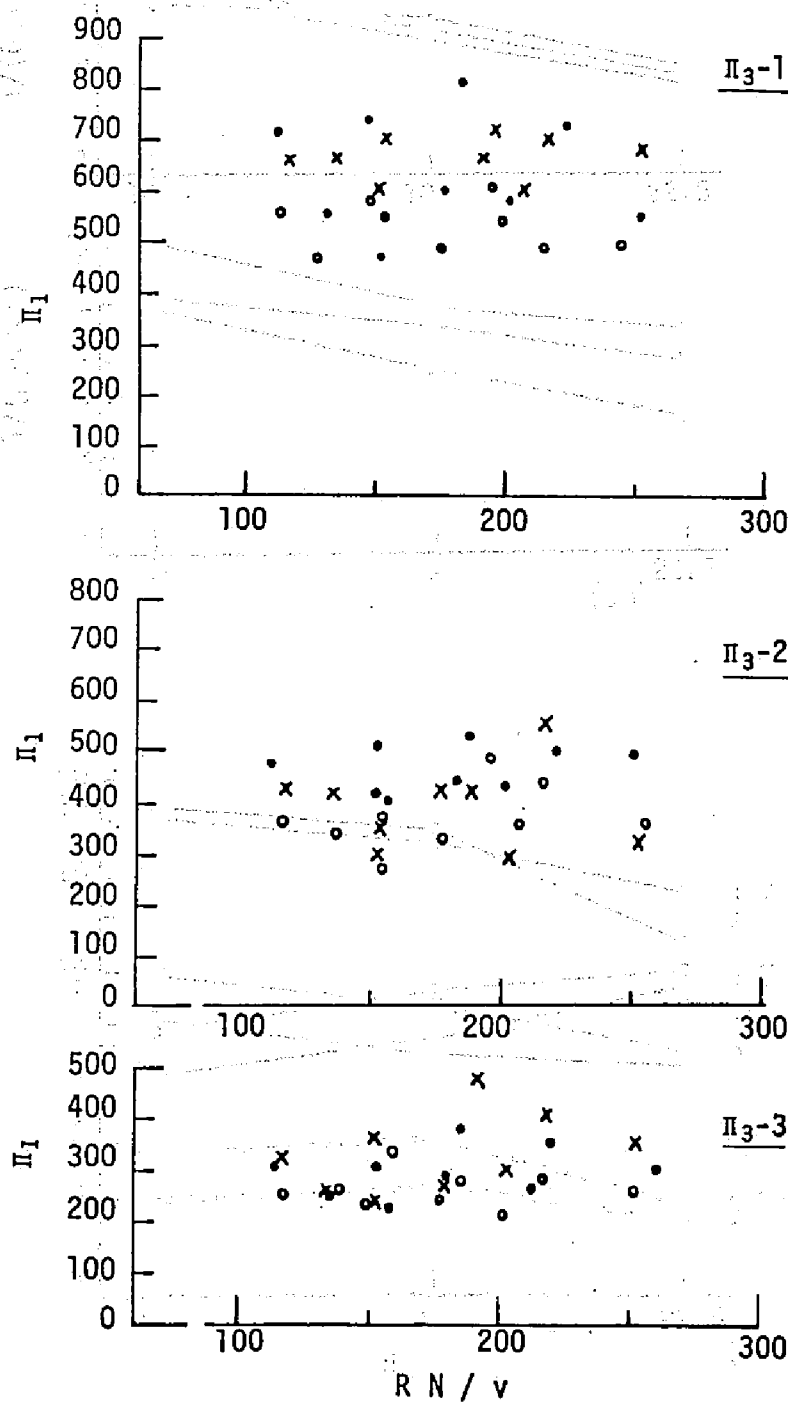


図 3-49.

Π_1 と RN/v の関係
(人工土 A)

• P

○ M-1

x M-2

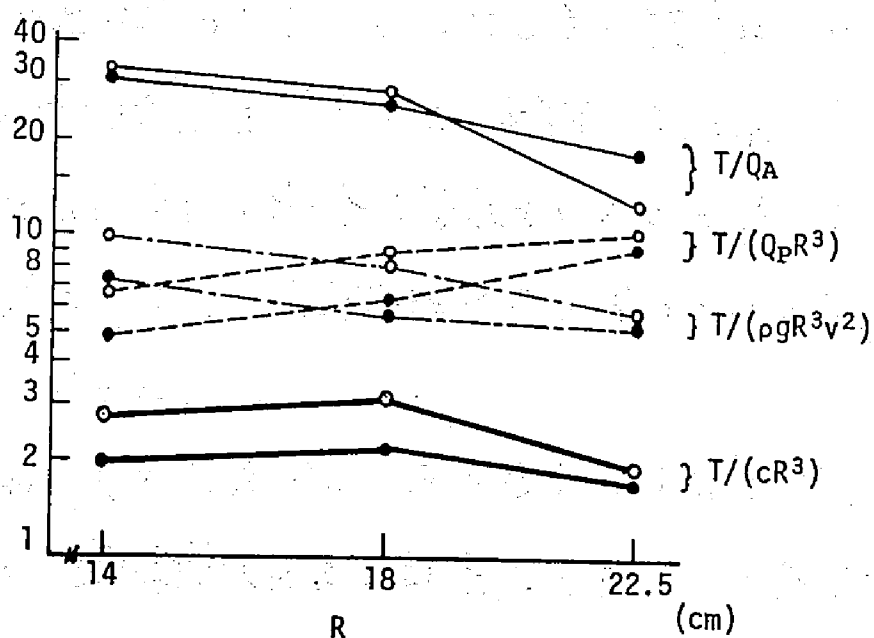
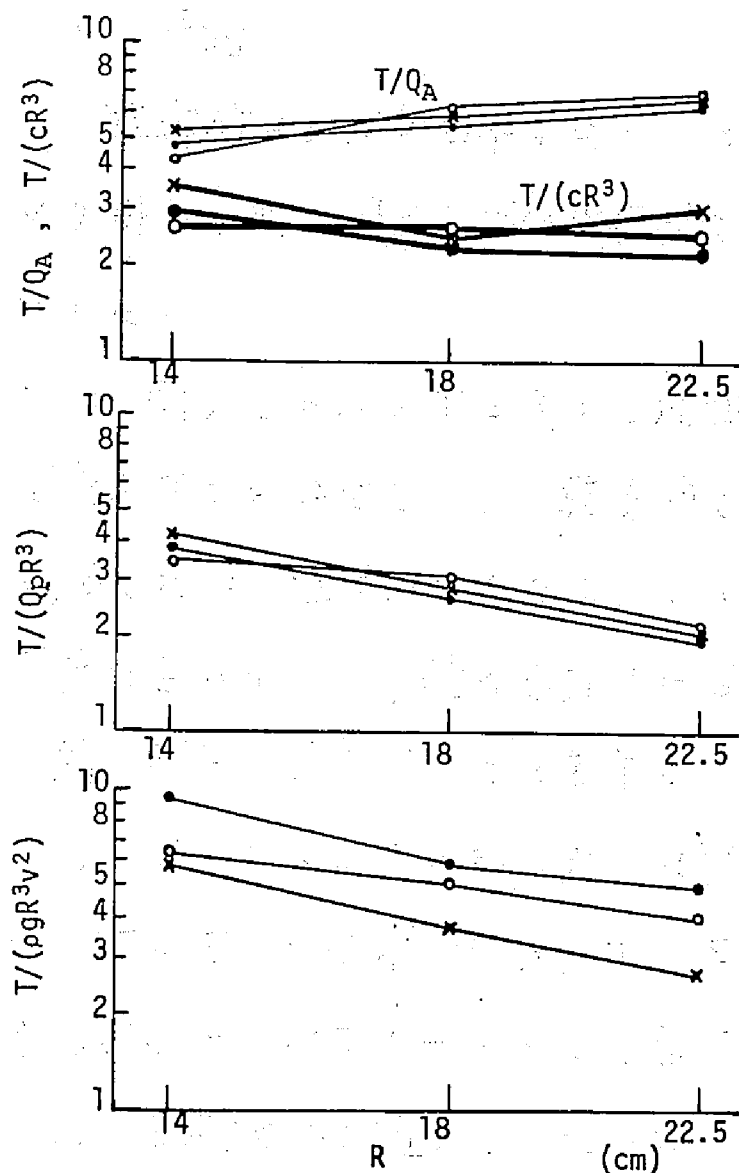


図 3-50 (a), (b)

耕うんトルクに
関する項目と
耕うん皿の大
きさとの関係

5 要約

乾燥砂および含油率の異なる2種類の人工土においてロータリ耕うん机に関する相似性実験を行ない、以下の事を明らかにした。

1) 耕うんトルク T と耕うん机回転半径 R の関係は、 $T \propto R^a$ で表わすことができる。乾燥砂では $a \approx 4$ であるが、人工土 A, B では a の値は小さくなる。この事は、回転切削作用を伴う系においても、単純けん引系における抵抗とモデルサイズとの同じ関係が成立することを示している。

2) 耕うんトルクに最も大きな影響を与えるのは耕深であった。 T と Z, v, N の関係は、 T と Zv/N の関係をグラフ化し耕うんピッチをパラメータとして示す新しい方法が提示された。

3) 実験全体を通じて、土-ロータリ系の相似性の成立と確かな信頼度の下に認めることはできなかった。しかし、ほぼ相似性が認められるとみなしうる数例について、各土の因子による予報精度をグラフ上で検討した結果、貫入抵抗曲線から求めた Q_p, Q_A の場合が勝れていることが見出された。ただし、例数が少なく、統計処理によりそのことを立証するまでには至らなかった。

4) 人工土 A, B は、耕うんトルクおよび貫入抵抗線図の両面から、準備操作による再現性において十分信頼しうるものであることが判明した。

IV 結 言

土に關係する機械・器具の模型試験技術を確立するためには、実物・モデル兩系を關係づける相似條件を明らかにすることが急務である。本研究においては、土として、乾燥砂・砂質ローム・人工土を、機械として、排土板・トラックスュー・ロータリルを採り上げ、相似條件中とくに、いかなる土の因子を選定すべきかについて実験を行ない検討をしてきた。その結果は、次のように要約できる。

1. 乾燥砂では、實際上、砂の性質因子を關係因子として選定しなくても相似性が成立することが、本実験の対象としたどの系においても確認された。抵抗は縮尺比 n の3乗で示される。
2. 粘着性を持つ土では、ひずみモデルとなる。ひずみの取扱いを種々検討した結果、各機械の作用深さまでの円板貫入抵抗の積分値またはアナログ量としての基準板抵抗を土の因子として選定することが、予報係数に対するひずみ係数の回帰性を保障し、ひいては、高い予報精度をもたらすことが明らかになった。

上記成果の斯界分野における意義に言及するならば、機械作用の種類に關係なく、乾燥砂では相似性が成立するであろうことが、低速度領域においてという条件付ではあるが、示唆さ

れたこと、および、機械の大きさに対応した土の強さ因子、それも、各機械が対象とする作用深さまでの土の状態を十分包含した土因子を選定することが、ひずみモデルにおいては有効であるという事である。

一方、土-機械系の実験においては、相似性に関する実験に限らず、土を一定にコントロールすること、つまり、土の状態の再現性が強く望まれる。土の状態変化が実験の組合せ条件による特性値への影響を不明なものにさせるからである。砂質ロームを用いた実験を通じ、特に、塑性限界付近の水分状態については、土の再現性という事に関し施す策がなかった。自然土壌を用いる限りにおいては、現在のところ、上記の状態の土については、よい方法がないと言える。しかも、不都合な事には、ひずみはそうした土壌において顕著に生じるという事実と土関係の機械、中でも農業機械は水田に代表されるような粘着力の高い土壌を作業の対象としているということである。

以上の事柄が、まず、人工土の調製、その性質に関する実験に、続いて人工土を用いた相似性実験へと移行させた動機を作った。その結果、自然土壌に模擬しうる人工土が得られたが、何よりも、その再現性がすぐれている事が大きく評価できる。人工土を利用したロータリの実験は、機械系の不備により、必ずしも、実験そのものは成功したとは言えないが、人工土の意義は大いに認められたところである。

一連の実験を終えた現在、研究対象および実験条件を広範に設定したために、個々の問題を深く掘り下げる点において、心残りが無いでもない。また、筆者はこの研究を数年前に着手したのであるが、種々の事情により中断を余儀なくされ、集中して実験に取り組む機会に恵まれなかつた事は誠に残念である。なお、本論文は一部を除いて公表済みであり、^{83)~91)}参考文献欄に記載する。

最後に、浅学非才を省みず本論文を作成するに至ったのは、一偏に、恩師 増田正三教授の御指導ならびに御厚情の賜物と深く感謝する次第である。また、松田良一教授、川村 登教授には、しばしば、御鞭撻のお言葉を、鳥取大学 田中 孝教授には、本研究の糸口の御教示を頂いた。衷心より、感謝の意を表する。更に、ともに実験に従事した専攻生諸君に御礼を申し上げる。

V. 参考文献

- 1) S. Lilley; Men, machines and history.. London, 1948
- 2) 川村 登; 模型プラウの相似法則について, 農機誌, 16(1,2), p.33-36, 1941
- 3) D. R. Freitag et al.; Similitude studies of soil-machine systems. Trans. of the ASAE, 13(2), p.201-212, 1970
- 4) G. Murphy; Similitude in engineering. Ronald Press, New York, 1950
- 5) J. C. Maxwell; On the mathematical classification of physical quantities. Proc. London Math. Soc., Vol.III, No.34, p.224, 1871
- 6) L. Rayleigh; On the viscosity of argon as affected by temperature. Proc. Roy. Soc., London, Vol.LXVI, p.68-74, 1899-1900
- 7) E. Buckingham; On physically similar systems; Illustrations of the use of dimensional equations. Phys. Rev. Vol.IV, No.4, p.345, 1914
- 8) P. W. Bridgman; Dimensional analysis. Yale Univ. Press, 1922
- 9) E. R. Van Driest; On dimensional analysis and the presentation of data in fluid flow problems. Journal of Applied Mechanics, Vol.13, No.1, p.A-34, 1946
- 10) A. H. Marckwick; Dimensional analysis of the bearing capacity of soil under tracked vehicles and its application to model tests. Road Research Note, RN/531, Road Research Laboratory, 1944
- 11) M. G. Bekker; Theory of land locomotion. University of Michigan Press, Ann Arbor, 1956
- 12) C. J. Nuttal; Scale model vehicle testing in non-plastic soil. Report 394, Experimental towing tank, Stevens Institute of Technology, 1949
- 13) C. J. Nuttal et al.; Scaled vehicle mobility factors. Report 18-2, WNRE, 1956
- 14) L. W. Larson et al.; Draft forces using mouldboard plows in agricultural soils. Trans. of the ASAE, 11(5), p.665-668, 1968
- 15) K. K. Barnes et al.; Similitude in studies of tillage implements forces. Agr. Engng. Jan. p.32-37, 42, 1960
- 16) National Tillage Machinery Laboratory; Similitude with plane chisels. NTML Annual Report, Section 1: 2-12, 1962
- 17) C. A. Reaves et al.; Similitude in performance studies of soil chisel systems. Trans. of the ASAE, 11(5) p.658-660, 664, 1968
- 18) B. S. Sirohi et al.; Similitude techniques applied to performance studies of cultivator sweeps. Trans. of the ASAE, 14(6), p.786-789, 1969
- 19) C. A. Reaves et al.; Similitude of bulldozer blades. Trans. of the ASAE, 12(5), p.577-579, 1969

- 20) R. I. Emori et al.; Feasibility of model study in earthworking equipment. Trans. of the ASAE, 8(2), p.298-300, 1965
- 21) B. N. Ghosh; A dimensional analysis approach to an experimental investigation. Journal of the East African Institute of Engineers, Vol.15, No.1, p.3-12, 1966
- 22) W. L. Harrison; Analytical prediction of performance for full size and small scale model vehicle. Proc. of 1st International Vehicle Systems, 678-702, 1961
- 23) C. J. Roma et al.; Scaled vehicle mobility factors. Report 61-49, U.S. Army Transportation Research Command, Ft. Eustis, Va., April, 1961
- 24) C. W. Wilson et al.; Scaled mobility factors. Technical Report, 61-67, U. S. Army Transportation Research Command, 1961
- 25) D. E. Cobb et al.; Scale model evaluation of earthmoving tools. Proc. of 1st International Conference on the Mechanics of Soil-Vehicle Systems, p.412-428, 1961
- 26) E. T. Vincent et al.; Rigid wheel studies by means of dimensional analysis. Report No.7841, Land Locomotion Laboratory, U. S. Army Tank Automotive Center, 1963
- 27) D. R. Freitag; A dimensional analysis of the performance of pneumatic tires on clay. Journal of Terramechanics, 3(3), p.51-68, 1966
- 28) D. R. Freitag; A dimensional analysis of the performance of pneumatic tires on sand. Trans. of the ASAE, 11(5), p.669-672, 1968
- 29) A. A. Stone et al.; Measurement of soil hardness. Agr. Engng., Vol.20, p.25-26, 1939
- 30) A. N. Zelenin; Basic physics of the theory of soil cutting. Moscow, 1950
- 31) R. L. Kondner; A Penetrometer study of the in situ strength of clay. Meter. Res. and Standards, 2: p.193-195, 1962
- 32) E. Hegedus; Plate sinkage study by means of dimensional analysis. Journal of Terramechanics, 2(2), p.25-32, 1965
- 33) F. L. Schuman; A similitude study of soil strength instruments. Iowa State University, 1966
- 34) E. L. Wegscheid et al.; Soil bin instrumentation. Agr. Engng., Aug., p.442-445, 463, 1967
- 35) D. G. Batchelder et al.; A continuous linear soil bin. Trans. of the ASAE, 14(6), p.1009-1010, 1971
- 36) B. B. Hanamoto; Artificial soils for laboratory studies in land locomotion. Land Locomotion Laboratory Report No.20, 1957
- 37) E. T. Selig et al.; A study of artificial soils. Armour Research Foundation of Illinois Technology, ARF 8920-14, 1960

- 38) A. C. Bailey et al.; Comparison of methods of measuring soil shear strength using artificial soils. Trans. of the ASAE, 8(2), p.153-156,160, 1965
- 39) A. Y. Korayem; Artificial soils simulate natural soils in tillage studies. Part 1. Frictional properties of artificial soils. Trans. of the ASAE, 8(2), p.145-146,150, 1966
- 40) C. A. Reaves; Artificial soils simulate natural soils in tillage studies. Part 2. Similitude of plane chisels in artificial soils. Trans. of the ASAE, 8(2), p.147-150, 1966
- 41) T. D. Langston; A similitude study with static and dynamic parameters in an artificial soil. M.S. Thesis, University of Illinois, 1968
- 42) S. J. Clark et al.; Soil bins, artificial soils and scale-model testing. Trans. of the ASAE, 8(2), p.198-202, 1968
- 43) F. M. Zoz et al.; Effects of section thickness on shear characteristics of an artificial soil. Trans. of the ASAE, 8(1), p.6-10, 1968
- 44) L. W. Sprinkle et al.; A similitude study with static and dynamic parameters in an artificial soil. Annual Meeting of the ASAE, paper No.69-114, 1969
- 45) W. R. Gill; Determination of oil content of artificial soils. Trans. of the ASAE, 13(4), p.417-418, 1970
- 46) T. S. Chisholm et al.; A soil bin study of three-dimensional interference between flat plate tillage tools operating in an artificial soil. Trans. of the ASAE, 15(1), p.43-48, 1972
- 47) H. L. Langhaar; Dimensional analysis and theory of models. John Wiley & Sons, Inc., London, 1951
- 48) D. F. Young; Similitude of soil-machine systems. Journal of Terramechanics, 3(2), p.57-70, 1966
- 49) R. D. Wismer et al.; Performance of plane soil cutting blades in clay. Trans. of the ASAE, 15(2), p.211-216, 1972
- 50) C. E. Johnson et al.; Identifying soil dynamic parameters for soil-machine systems. Trans. of the ASAE, 15(1), p.9-13, 1972
- 51) J. K. Wang et al.; Predicting tillage tool draft using four soil parameters. Trans. of the ASAE, 15(1), p.19-23, 1972
- 52) D. R. Freitag et al.; Similitude studies of soil-machine systems. Journal of Terramechanics, 7(2), p.25-59, 1970
- 53) R. I. Schafer et al.; An interpretation of distortion in the similitude of certain soil-machine systems. Trans. of the ASAE, 12(1), p.145-149, 1969
- 54) B. P. Verma et al.; A distorted-model theory for nonuniform soil strength profiles. Trans. of the ASAE, 14(2), p.359-364, 1971

- 55) J. K. Wang et al.; A new technique for draft prediction. Journal of Agricultural Engineering Research, 15(3), p.244-254, 1970
- 56) B. P. Verma et al.; Compensated model theory in the similitude of soil-chisel systems. Trans. of the ASAE, 14(2), p.353-358, 1971
- 57) 田中 孝; 土-機械系における相似性の研究. 農機誌, 34(4), p.300-311, 1973
- 58) B. P. Verma et al.; Vector lengths as fundamental dimensions in a similitude study. Trans. of the ASAE, 16(3), p.456-459, 1973
- 59) H. E. Huntley; Dimensional Analysis. Dover, 1951
- 60) J. S. Siemens; Soil bin for model studies on tillage tools and traction devices. Journal of Terramechanics, 1(2), p.56-67, 1964
- 61) A. J. Green et al.; Measuring soil properties in vehicle mobility research, strength-density relations of an air-dry sand. Technical Report No.3-652, Report 1, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1964
- 62) 渡辺 一郎; 次元解析演習, 有宏書房, 1950
- 63) 坂山大三; 次元解析の理論と応用, 共立出版, 1956
- 64) 本間 仁, 他1名; 次元解析・最小2乗法と実験式, コロナ社, 1966
- 65) 土質工学会編; 土質試験法, 1964
- 66) C. A. Reaves et al.; Similitude in performance studies of soil-chisel systems. 59th Annual Meeting, paper No.66-125, 1966
- 67) 岸根卓郎; 理論・応用統計学, 養賢堂, 1969
- 68) D. O. Kuether et al.; Effect of track-shoe design on traction. Trans. of the ASAE, 8(2), p.244-245, 1965
- 69) T. Ikeda et al.; A track shoe for soft soil. Trans. of the ASAE, 11(6), p.746-749, 753, 1968
- 70) 藤本武助; 流体工学大要, 養賢堂, 1963
- 71) A. H. Shapiro; Shape and flow. Double & Company, Inc., New York, 1961
- 72) 松尾昌樹; ロータリ耕耘に関する基礎的研究, 山形大学紀要(農学), 第3巻第4号, 1961
- 73) 梅田重夫; ロータリ式耕耘刃の耕耘作用に関する研究, 学位論文, 1960
- 74) W. Söhne; Einfluss von Form und Anordnung der Werkzeuge auf die Antriebsmomente von Ackerfräsen. Grundlagen der Landtechnik, Heft 9, p.69-87, 1957
- 75) D. B. Furlong; Rotary tiller performance test on existing tines. Technical Report No.1049, F.M.C., Corp., 1956
- 76) J. G. Hendrick et al.; Rotary-tiller design parameters. Part 1. Direction of rotation. Trans. of the ASAE, 14(4), p.669-674, 683, 1971

- 77) J. G. Hendrick et al.; Rotary-tiller design parameters.
Part 2. Depth of tillage. Trans. of the ASAE, 14(4), p.675-678, 1971
- 78) J. G. Hendrick et al.; Rotary-tiller design parameters.
Part 3. Ratio of peripheral and forward velocities. Trans. of the ASAE, 14(4), p.679-683, 1971
- 79) J. G. Hendrick et al.; Rotary-tiller design parameters.
Part 4. Blade clearance angle. Trans. of the ASAE, 17(1), p.4-7, 1974
- 80) B. N. Ghosh; The Power requirements of a rotary cultivator. Agricultural Engineering Research, 12(1), p.5-12, 1967
- 81) 関東東山農試農機具部; ロータリ耕うん具の負荷特性に関する研究, 昭和33年度試験成績, p.45-57, 1959
- 82) I. M. Grinchuk et al.; The problem of selecting of basic construction parameters and systems of operation of soil rotary tillers.
Traktory i Sel'khoz mashiny, I : p.25-28, 1969
- 83) 増田正三, 田中 孝, 山崎 稔; 土-機械系の相似性に関する研究(初報), 農機誌, 30(4), p.197-200, 1969
- 84) 増田正三, 田中 孝, 山崎 稔, 芦田喜和, 寺内喜一; 土-機械系に関する相似性の研究, 履帯の相似性について. 農機学会関西支部報, Vol.26, p.70-73, 1969
- 85) 増田正三, 田中 孝, 山崎 稔, 寺内喜一, 芦田喜和; 土-機械系に関する相似性の研究, 履帯の形状について. 農機学会関西支部報, Vol.26, p.74-77, 1969
- 86) 山崎 稔, 増田正三, 田中 孝; 土-機械系の相似性に関する研究(第2報), 農機誌, 33(2), p.105-111, 1972
- 87) 笈田 昭, 山崎 稔, 増田正三; 人工土に関する実験的研究(第1報), 農機誌, 36(2), p.251-263, 1974
- 88) 山崎 稔, 笈田 昭, 増田正三; 人工土に関する実験的研究(第2報), 農機誌, 36(3), p.391-398, 1974
- 89) 山崎 稔, 増田正三; 土-機械系の相似性に関する研究(第3報), 農機誌, 36(4), p.518-524, 1975
- 90) 増田正三, 山崎 稔, 松本昭幸; 人工土におけるロータリ耕うん具のモデル実験. 農機学会関西支部報, Vol.38 p.5-8, 1975
- 91) 笈田 昭, 山崎 稔, 増田正三; 人工土に関する実験的研究(第3報), 農機誌, 36(4), p.525-536, 1975